



KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GmbH

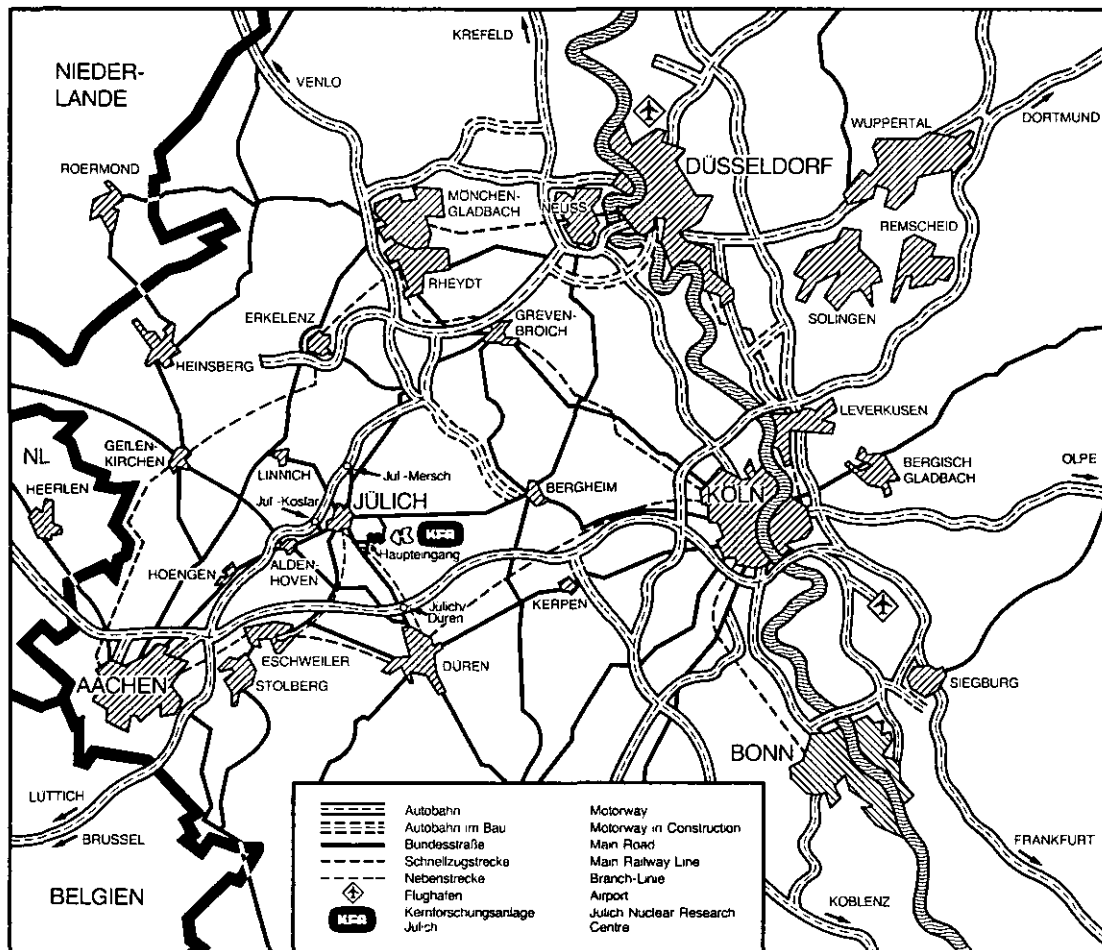
Institut für Reaktorentwicklung

**Theoretische Studien am Erstkern
eines 300 MWe Kugelhaufenreaktors
während des Beladens**

von

Y. Zhao, R. D. Neef und H. Schaal

**Jül - Spez - 151
Mai 1982
ISSN 0343-7639**



Als Manuskript gedruckt

Spezielle Berichte der Kernforschungsanlage Jülich - Nr. 151

Institut für Reaktorentwicklung Jülich - Spez - 151

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH

Postfach 1913 · D-5170 Jülich (Bundesrepublik Deutschland)

Telefon: 02461/610 · Telex: 833556 kfa d

E. Pohley
Juli '82

**Theoretische Studien am Erstkern
eines 300 MWe Kugelhaufenreaktors
während des Beladens**

von

Y. Zhao, R. D. Neef und H. Schaal

THEORETISCHE STUDIEN AM ERSTKERN EINES 300 MWe
KUGELHAUFENREAKTORS WAHREND DES BELADENS

von

Y. Zhao*
R.D. Neef
H. Schaal

KURZFASSUNG

Theoretische Analysen eines Beladeexperimentes für einen Kugelhafenreaktor besonders im Hinblick auf die Belademethode wurden durchgeführt. Der vorliegende Bericht beschreibt die Rechenmodelle und liefert Informationen für das erste Beladen.

Eine alternative Belademethode, bei der der konische Bereich des Cores beim Beginn des Beladeexperimentes mit reinen Graphitkugeln aufgefüllt wird, wurde untersucht. Es zeigt sich, daß Stickstoff als Neutronenabsorber zur Kompensation der eingebauten Überschubreaktivität geeignet ist.

* Abgeordnet als Gastwissenschaftler in die KFA von:
Institut für Nukleare Energietechnologie, Quinghua Universität,
P.O. Box 1021, Beijing, Volksrepublik China

THEORETICAL STUDIES FOR THE INITIAL CORE OF A 300 MWe
PEBBLE BED REACTOR DURING LOADING

by

Y. Zhao*

R.D. Neef

H. Schaal

ABSTRACT

Theoretical analysis on a loading experiment of a pebble bed reactor particularly in regard to the loading method, has been performed. This report describes the calculating models and gives information for the first loading.

An alternative loading scheme has been examined, in which at the beginning of the loading experiment the lower part of the core is filled with graphite spheres only. It is shown that nitrogen as a neutron poison for compensating excess reactivity may be used.

* Delegated as Guest Scientist to KFA from:
Institute of Nuclear Energy Technology, Quinghua University,
P.O. Box 1021, Beijing, Peoples Republic of China

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. EINLEITUNG	1
2. KURZBESCHREIBUNG DES 300 MWe KUGELHAUFEN-REAKTORS	3
3. RECHENMODELLE UND PROGRAMME	7
3.1 Nukleare Datenbibliotheken	7
3.2 Zellrechnungen	9
3.3 Berücksichtigung der Hohlräume	11
3.3.1 Der obere Hohlraum	11
3.3.2 Strömungseffekte	14
3.4 Darstellung der Absorberstäbe	15
3.5 Wirkungsquerschnitte für einige Sonderzonen	17
3.6 Kondensation der Wirkungsquerschnitte	17
3.7 Diffusionsrechnungen	18
3.8 Auswertung der Reaktivitätsmessungen	18
4. ANALYSEN ZUM ERSTKERN	22
4.1 Berechnung der nuklearen Daten	22
4.2 Das stabfreie Core	26
4.3 Stabwirksamkeiten und Korrekturen zur Auswertung der Meßergebnisse	31
4.4 Anwendung von Stickstoff	39
4.5 Ladevorgang und Belademethoden	40
4.5.1 Stäbe zur Kompensation der Überschußreaktivität	40
4.5.2 Stickstoff zur Kompensation der Überschuß- reaktivität	41
4.5.3 Alternative Belademethode	41
5. ZUSAMMENFASSUNG	44
6. LITERATURVERZEICHNIS	45

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AE	Absorberelement
BE	Brennelement
GE	Moderatorelement
C.P.	Coated Particle
R1	Corestäbe auf Radius 681,5 mm
R2	Corestäbe auf Radien 1180,4 mm und 1363 mm
R3	Corestäbe auf Radien 1803,08 mm und 2044,5 mm
R4	Corestäbe auf Radius 2360,8 mm
RS	Reflektorstäbe

1. EINLEITUNG

Bei der ersten Kernbeladung eines Reaktors wird das Core aus Sicherheitsgründen schrittweise beladen. Während des Beladevorganges führt man umfangreiche nukleare Messungen /1/ am Reaktor durch. Solche Messungen dienen erstens dazu, den Reaktor kontrolliert zu beladen, zweitens zur Überprüfung, ob der Reaktor hinsichtlich Reaktivität, Flußverteilung, Stabwirksamkeit und Regelbarkeit den Auslegungsdaten entspricht und für die geplante Leistung betriebssicher ist.

Für Nachfolgereaktoren /2/ des erprobten 15 MWe-AVR in Jülich wurden im Institut für Reaktorentwicklung der KFA Jülich theoretische Untersuchungen zur Inbetriebnahme eines Kugelhaufen-erstkerns als Test der Rechenmethoden durchgeführt. Dabei wurden der Multiplikationsfaktor und die Stabwirksamkeit verschiedener Corekonfigurationen bestimmt und die reaktorphysikalischen Parameter sowie die Korrekturen zur Auswertung der dynamischen Meßergebnisse der Stabwirksamkeit ermittelt.

Ein erstes Beladeexperiment wird üblicherweise bei ca. 45°C unter Luft durchgeführt. Dieses erste Core soll aus einer für Innencore und Außencore unterschiedlichen Mischung von kugelförmigen Brennelementen (BE) mit Graphitelementen (GE) und Absorberelementen (AE) bestehen. Eine Beschickungsanlage dient der Zugabe und der Entnahme dieser Kugeln. Im Gleichgewichtsbetriebszustand wird die Grenze zwischen Innencore und Außencore durch das Kugelfließen und die kontrollierte Zugabe für Innen- und Außencore bestimmt. Zuerst wird ein Beladevorgang untersucht, der die Schüttung vom leeren Reaktor her aufbaut. Dabei soll aber die Grenze künstlich aufgebaut werden. Zur Vereinfachung dieser Aufgabe wird eine alternative Belademethode untersucht. Aufgrund der Umwälzmöglichkeit mit der Beschickungsanlage und der Eigenschaft des Kugelfließens bietet sich an,

den unteren Bereich des Cores vor dem Anfang des Beladeexperimentes mit reinen Graphitkugeln aufzufüllen. Das Beladen wird dann erst im Oberteil des Cores von der Beschickungsanlage durchgeführt. Nachdem der obere Teil des Cores voll beladen ist, werden die Graphitkugeln von unten entnommen, während die Gemische der BE, GE und AE von oben weiter zugegeben werden.

Das voll beladene kalte stabfreie Core soll eine Überschubreaktivität von etwa 9 % haben. Zwecks Kompensation dieser Überschubreaktivität und Messung der Stabwirksamkeit mittels der Vergiftungsmethode wird ferner die Anwendungsmöglichkeit von Stickstoff bei der Erstbeladung untersucht.

2. KURZBESCHREIBUNG DES 300 MWe KUGELHAUFEN-REAKTORS

Der Modell-Reaktor ist für die Leistung $750 \text{ MW}_{\text{th}}$ (=300 MWe) ausgelegt. Mit der mittleren Leistungsdichte 6 MW/m^3 beträgt das Corevolumen 125 m^3 , das von etwa 700000 BE ausgefüllt wird. Die Reaktoreinbauten bestehen aus Seiten-, Boden- und Deckenreflektor, die aus einzelnen Graphitblöcken zusammengesetzt sind. Abb. 1 gibt eine schematische Darstellung.

Der zylindrische Teil des Seitenreflektors hat einen mittleren Innendurchmesser von 561 cm und eine Höhe von 580 cm. Er ist aus zwei Reihen von Kreissegmenten zusammengesetzt und hat eine Dicke von 100 cm. Der Bodenreflektor ist konisch, er hat eine Außenhöhe von 155,5 cm und einen Neigungswinkel von 30° nach innen. Aufgrund der sich in ihm befindenden Kühlkanäle ist er in mehrere Zonen aufgeteilt. Der Kugelabzug liegt in der Mitte des Bodenreflektors, er hat einen Durchmesser von 80 cm. Der Deckenreflektor ist 200 cm dick. Seiner Konfiguration gemäß ist er in 3 Zonen aufgeteilt. Die Neutronendetektoren liegen an der Außenwand des Seitenreflektors in Höhe von 260 cm. Das Core ist in zwei Zonen aufgeteilt, nämlich Innencore und Außencore. Die Grenze zwischen Innen- und Außencore ist in Abb. 1 eingezeichnet.

Abb. 2 zeigt das Brennelement und ein Coated Particle (C.P.), dessen Kern aus $(\text{Th,U})\text{O}_2$ besteht. Das Brennelement enthält 10,2 g Thorium und ca. 1 g Uran mit 93 %iger ^{235}U -Anreicherung. Die Partikel haben einen Durchmesser von 400μ . Zur Kompensation der anfänglichen Überschußreaktivität werden Absorberelemente zugegeben. Diese enthalten jeweils 40 mg Bor und 4,2 g Hafnium.

Im Corebereich befinden sich 42 Corestäbe, die nach ihren radialen Positionen in 4 Gruppen, nämlich R1, R2, R3 und R4, eingeteilt sind. Im Seitenreflektor befinden sich 36 Reflektorstäbe

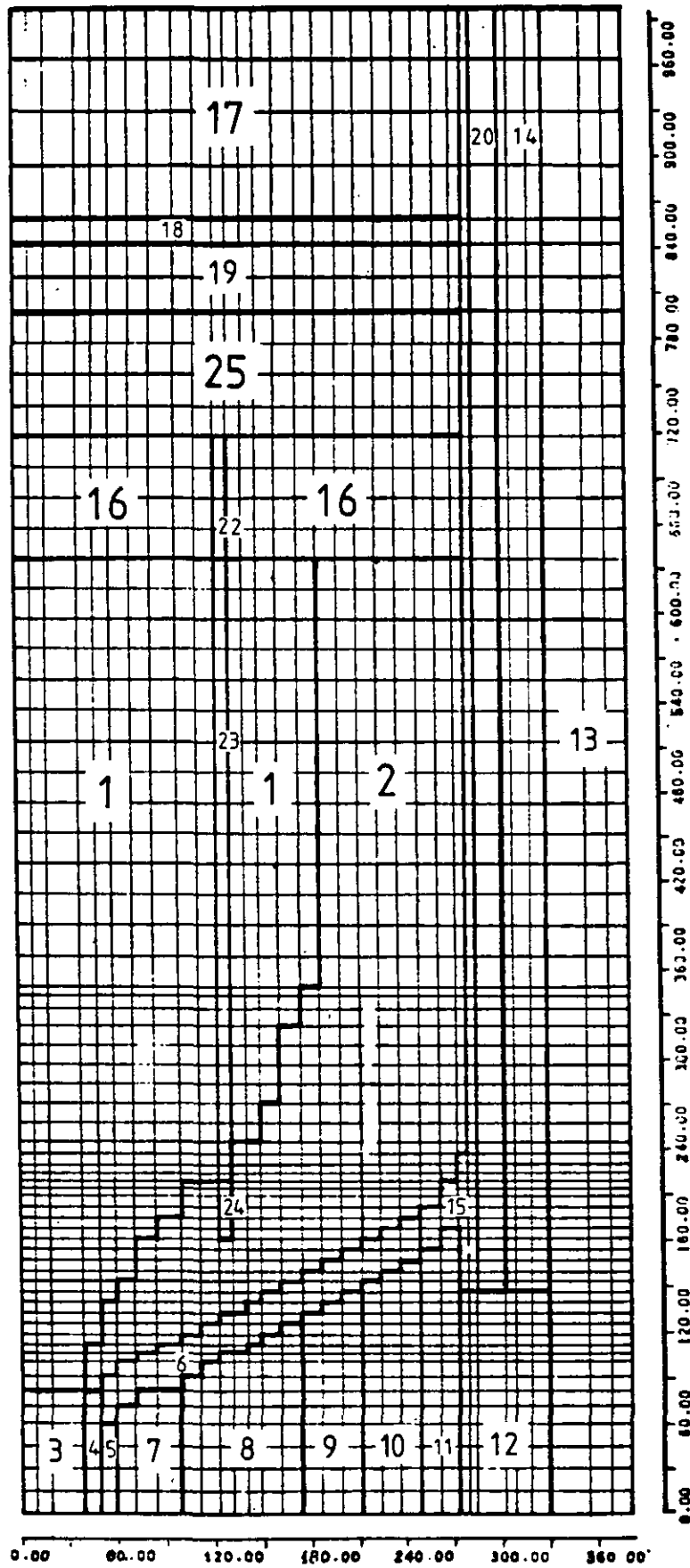


Abb.1: Zoneneinteilung für die Rechnung

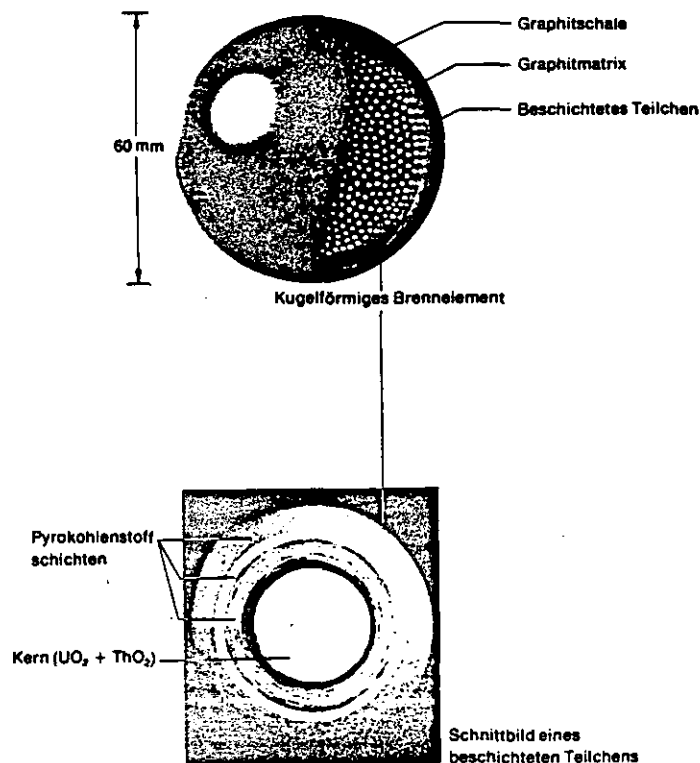


Abb.2: HTR-Brennelement

(RS). Jeder davon fährt in einer Bohrung im Gegensatz zu den Corestäben; die direkt in die Kugelschüttung einfahren. Die oberste Position der Corestäbe liegt 86,5 cm unterhalb der Unterkante des Deckenreflektors. Die unteren Grenzpositionen der R2-Stäbe bzw. der RS sind in Abb. 1 dargestellt.

Für die diesem Bericht zugrunde liegenden technischen Daten wurden von HRB /3/ typische Werte zur Verfügung gestellt. Tabelle 1 enthält die zugrundegelegten Mischungen der Betriebselemente in der Nähe der 1. Kritikalität.

Tabelle 1: Mischungsverhältnisse und Füllfaktor des Cores in der Nähe der 1. Kritikalität

	Innencore	Außencore	Core
Volumen (m ³)	10.863	31.537	42.400
Füllfaktor	0.618	0.618	0.618
BE- Brennelemente	23.887	107.486	131.373
AE - Absorberelemente	4.723	9.163	13.886
GE-Moderatorelemente	30.543	55.499	86.042
Gesamt	59.153	172.148	231.301

3. RECHENMODELLE UND PROGRAMME

Zur Analyse wurden die in der KFA-Jülich für Auslegungsrechnungen des HTR verwendeten Rechenverfahren und Computerprogramme eingesetzt. Dazu wurde hier das modulare Programmsystem RSYST /4,5/ zur Erzeugung von Gruppenkonstanten und homogenisierten Wirkungsquerschnitten verwendet. Mit CITATION /6/ wurden zweidimensionale Diffusionsrechnungen in 6 Energiegruppen durchgeführt. Alle nuklearen Daten basieren auf ENDF/B-IV.

3.1 Nukleare Datenbibliotheken

Ausgehend von den beiden problemunabhängigen Datenbibliotheken THERM-126 und GGC-4, die aus ENDF/B-IV abgeleitet sind, werden kondensierte Gruppenkonstanten erzeugt. THERM-126 in 126 Gruppen von 10^{-5} eV bis 3,05 eV enthält für alle relevanten Nicht-1/v-Absorber für alle Energiegruppen die Werte σ_f , σ_{tr} , σ_a , $\nu\sigma_f$ und σ_{tot} . Für die Moderatoren ist außer diesen Werten auch die gesamte Streumatrix gegeben. Für Nicht-Moderatoren kann die Streumatrix nach dem Gasmodell berechnet werden. Die GGC-4 Bibliothek enthält in 99 Gruppen von 0,414 eV bis 14,9 MeV Resonanzparameter, elastische Streumomente von P_0 bis P_3 , inelastische und (n,2n)-Streumatrizen, σ_f , σ_a , $\nu\sigma_f$, σ_{tot} , σ_s und σ_{smooth} .

Von den beiden Bibliotheken aus wird die problemabhängige Bibliothek als RSYST-Datenbasis erzeugt. Das zur Kondensation verwendete Neutronenspektrum im thermischen Bereich wird null-dimensional und nach der B_N -Theorie mit dem Modul SPEKTRUM berechnet. Dabei werden die Überstreuungen aus dem epithermischen Bereich als Quellterme eingesetzt. Im epithermischen und schnellen Energiebereich wird mit dem Modul SPEKTRUS ebenfalls null-dimensional und nach der B_N -Theorie die Spektralrechnung durchgeführt (Abb.3). Da die Resonanzabsorber der BE in doppel-

ter Heterogenität aufgrund der statistischen Verteilung der C.P. im BE und der statistischen Kugelschüttung vorliegen, wird vor der Resonanzrechnung die Entkommwahrscheinlichkeit durch den Modul TERESKU berechnet /7/.

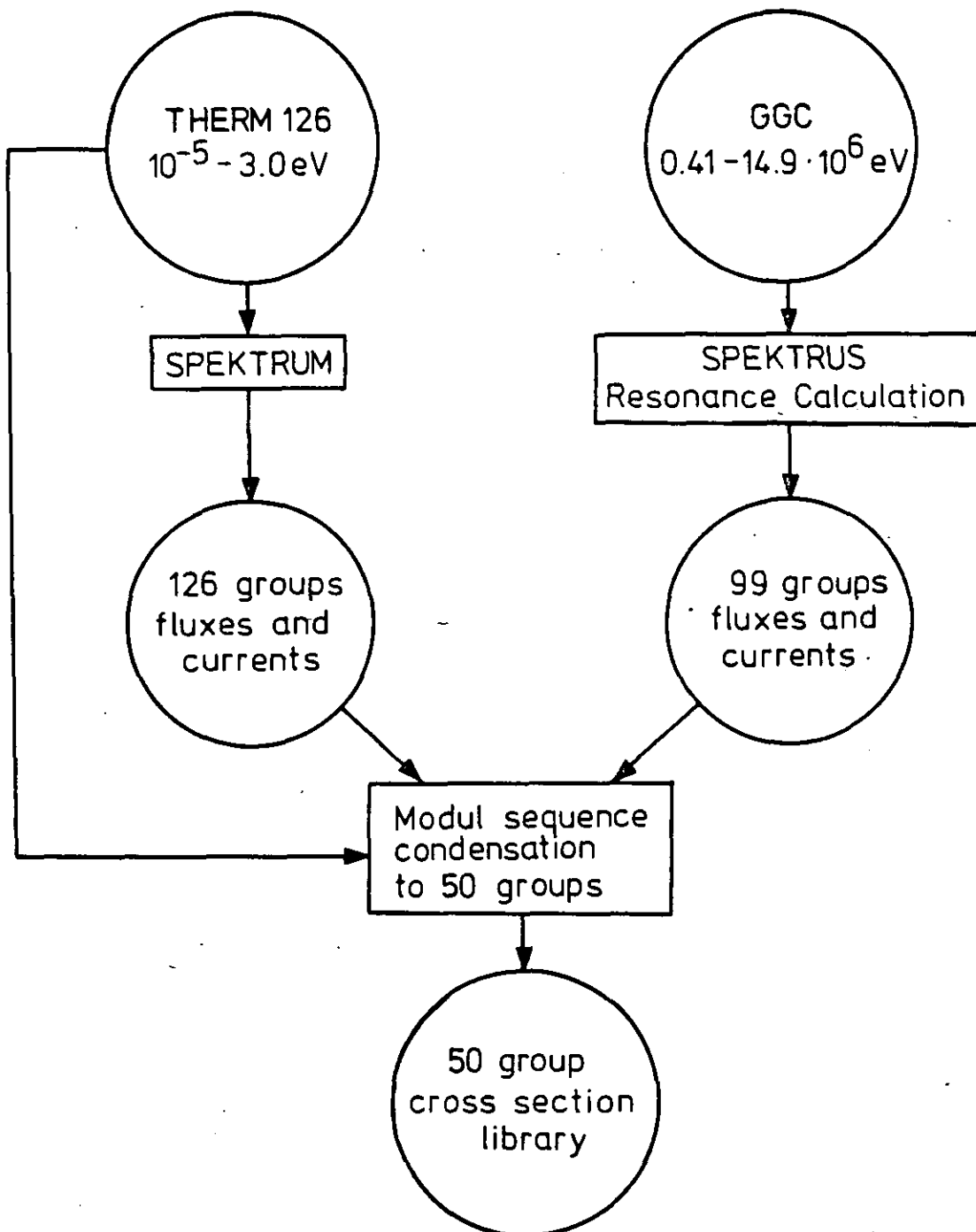


Abb.3: Erzeugung der problemabhängigen Datenbibliothek

3.2 Zellrechnungen

Zur Erzeugung der in den Corerechnungen verwendeten homogenisierten Wirkungsquerschnitte werden ein-dimensionale Zellrechnungen in Kugelgeometrie durchgeführt. Unter Wertung der statistischen Verteilung der C.P. in der Matrix und der Verteilung der Kugelschüttung werden für das Innencore bzw. das Außencore wie in Ref. /8/ je drei Zellrechnungen, nämlich für C.P.-Zelle, BE-Zelle und AE-Zelle, nacheinander durchgeführt. Die Konfigurationen dieser Modelle stellen sich in Tab. 2-4 dar. Der Radius jeder Zone wird durch Beibehaltung der Volumenverhältnisse bestimmt.

Die Berechnung der C.P.-Zelle dient zur Berücksichtigung der Neutronenflußabsenkung in den Coated Particles. Die über die inneren 2 Zonen homogenisierten Wirkungsquerschnitte werden in der 1. Zone der BE-Zelle verwendet. Bei der Berechnung der BE-Zelle werden die Wirkungsquerschnitte über die inneren 4 Zonen homogenisiert. Diese homogenisierten Wirkungsquerschnitte werden dann in die 4. Zone der AE-Zelle eingesetzt. Zur Berücksichtigung der starken Absorption im AE wird das Transportprogramm SN-1D /9/ verwendet. Für die anderen beiden Zellen wird der Modul ISOSTO /10/ nach der Erststoßtheorie eingesetzt.

Es sollte darauf hingewiesen werden, daß bei der ersten Berechnung der C.P.-Zelle die homogenisierten Wirkungsquerschnitte der äußeren Zone, nämlich AE, nicht vorhanden sind. Zur Berücksichtigung der Absorberelemente wurde folgende Iterationsmethode gewählt. Zuerst macht man eine Berechnung ohne die äußere Zone. Entsprechend wird eine Berechnung ohne AE-Zone für die BE-Zelle durchgeführt. Die erste AE-Zellrechnung kann aber dann mit allen in Tab. 4 dargestellten Zonen durchgeführt werden. Nach dieser ersten Iteration führt man noch eine 2. Iteration durch unter Berücksichtigung der Absorberelemente. Aufgrund der

Tabelle 2: Coated-Particle-Zellen

Zone	Komposition	R/cm, IC	R/cm, AC
1	Kern (U, Th) O ₂	0.02000	0.02000
2	PyC + Matrix	0.06810	0.06810
3	BE-Schale	0.08882	0.08882
4	Luft	0.10428	0.10428
5	GE + Luft	0.13625	0.11980
6	AE + Luft	0.14016	0.12201

Tabelle 3: Brennelementzellen

Zone	Komposition	R/cm, IC	R/cm, AC
1	C.P. + Matrix	2.3000	2.3000
2	BE-Schale	3.0000	3.0000
3	Luft	3.5220	3.5220
4	GE + Luft	4.6018	4.0463
5	AE + Luft	4.7339	4.1207

Tabelle 4: Absorberelementzellen

Zone	Komposition	R/cm, IC	R/cm, AC
1	Absorberkern	2.3000	2.3000
2	AE-Schale	3.0000	3.0000
3	Luft	3.5220	3.5220
4	BE + AE + Luft	8.1259	9.3630

Abweichung der beiden Rechnungen voneinander kann man feststellen, ob eine weitere Iteration durchzuführen ist oder nicht.

3.3 Berücksichtigung der Hohlräume

In einem gasgekühlten Reaktor mit kugelförmigen Brennelementen müssen verschiedene Arten von Hohlräumen berücksichtigt werden. Darunter sind zu nennen der obere Hohlraum, Hohlräume zwischen den Kugeln und Kanäle in den Reflektoren. Für folgende Hohlräume werden verschiedene Korrekturen der Diffusionskonstanten durchgeführt:

3.3.1 Der obere Hohlraum

Nach /11/ ist es möglich, die flüßausgleichenden Eigenschaften des oberen Hohlraums eines Kugelhaufenreaktors mit ausschließlich diffusionstheoretischen Methoden zu berücksichtigen. Dabei wird der Hohlraum unter Erhaltung seiner Geometrie durch eine Zone mit anisotropen Diffusionskonstanten beschrieben. Die Diffusionskonstanten hängen nur von der Geometrie des Hohlraums ab. Die dazu abgeleiteten Gleichungen zur Berechnung dieser anisotropen Diffusionskonstanten lauten

$$D_z = \frac{(H+4)\sqrt{H^2+4} - 8 + 4H - H^2}{12H}$$

$$D_r = \frac{3/2 D_z H^2 (H\sqrt{H^2+4} - H^2 - 2 + 4\ln \frac{H+\sqrt{H^2+4}}{2H})}{(24+14H+2H^2+H^3)\sqrt{H^2+4} - 48 - 28H - 16H^2 - 2H^3 - H^4 + \ln \frac{H+\sqrt{H^2+4}}{2}}$$

Dabei ist

H das Verhältnis der Höhe des Hohlraumes zu seinem Radius

D_z bzw. D_r die Diffusionskonstante in Z-Richtung bzw. in R-Richtung dividiert durch den Radius des Hohlraums

Diese Beziehungen sind in Abb. 4 dargestellt. Für einen großen Reaktor liegt der Unterschied der k_{eff} -Werte nach der Diffusionsrechnung mit CITATION und nach der Transportrechnung mit TWOTRAN nach /11/ bei ungefähr 0,01 %. Bei höherem Gasdruck, wo die "physikalischen" Diffusionskonstanten des Hohlraumes relativ klein sind, könnten aber die Diffusionskonstanten des Gases direkt für den oberen Hohlraum verwendet werden. Tab. 5 gibt einen Vergleich zwischen den "physikalischen" und den korrigierten anisotropen Diffusionskonstanten für den oberen Hohlraum. Da Stickstoff einen relativ großen Streuwirkungsquerschnitt hat, kann man bei einem Druck von 40 bar die Diffusionskonstanten von Stickstoff verwenden.

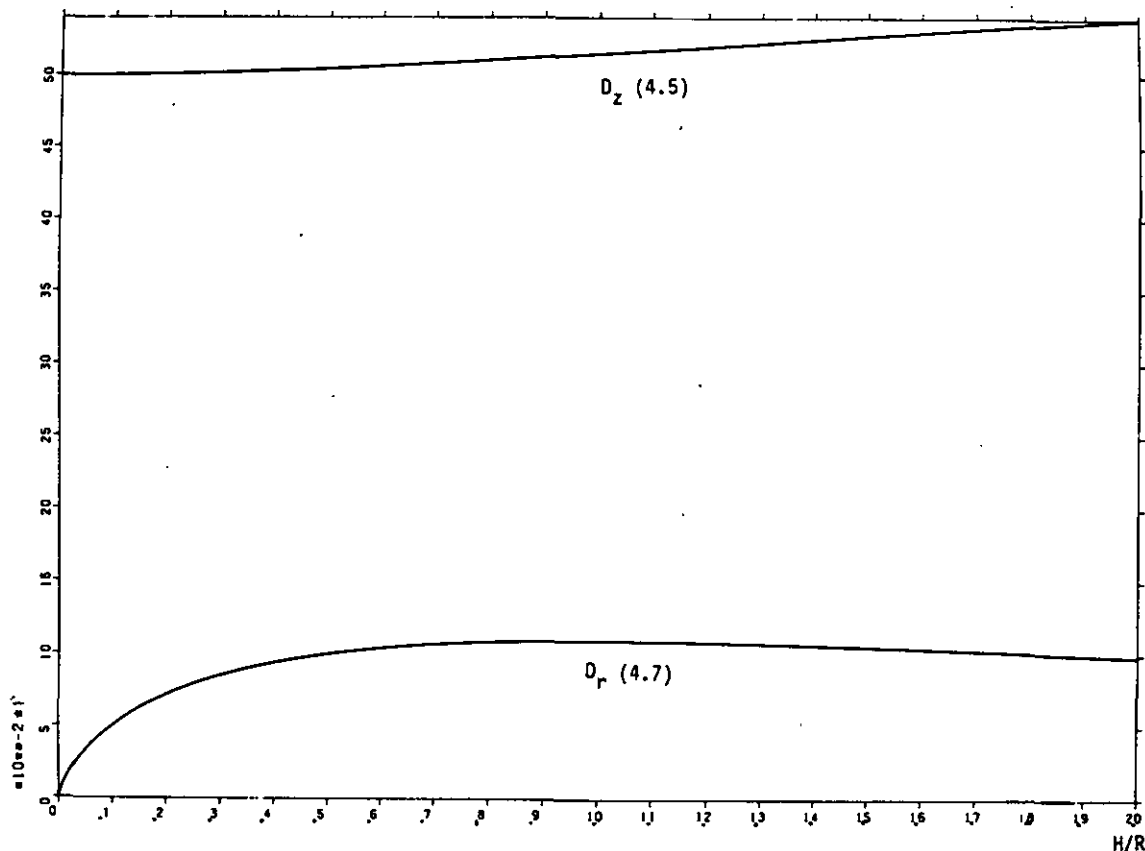


Abb.4: Übersicht über den Verlauf von D_z und D_r aus Lit./11/

Tabelle 5: Vergleich zwischen Diffusionskonstanten für den oberen Hohlraum (cm)

Gruppe - Nr.	1	2	3	4	5	6
Luft 1 b ^a	3592.3	1218.4	790.29	756.49	727.80	666.26
N ₂ 10 b ^a	383.95	108.15	66.11	63.03	60.44	54.95
N ₂ 40 b ^a	98.29	27.27	16.60	15.82	15.17	13.78
He 40 b ^a				489.05	487.80	484.99
D _r /D ₂ kr ^b			29.17	149.22		
D _r /D ₂ vo ^c			26.93	141.37		

a Physikalische Diffusionskonstanten bei 20°C

b bzw. c Korrigierte anisotrope Diffusionskonstanten in Füllhöhe
von 97.5 bzw. 438.0 cm.

3.3.2 Strömungseffekte

Zur Bestimmung der Strömungskorrektur in den Hohlräumen zwischen den Kugeln sind bereits zahlreiche theoretische Arbeiten durchgeführt worden. Unter Berücksichtigung der Statistik in der Kugelschüttung wird eine modifizierte Behrenskorrektur /12,13/ verwendet. Die dazu abgeleiteten Korrekturformeln lauten:

$$D_c = D_h + C_B$$

$$C_B = \frac{2R}{9} \cdot \frac{(1-f)^2}{f} \cdot \left[1 + \frac{1}{8} \left(\frac{f}{1-f} \right)^2 \right]$$

Dabei ist

D_c bzw. D_h	die korrigierte bzw. homogenisierte Diffusionskonstante
C_B	der Korrekturterm für die Diffusionskonstante
R	der Radius der Kugeln
f	der Füllfaktor in der Kugelschüttung

Bei BE-Kugeln von 3 cm Radius und einem Füllfaktor von 0,618 der Kugelschüttung wird ein konstanter Wert

$$C_B = 0,2089 \text{ cm}$$

zu der energieabhängigen Diffusionskonstante D_h für die freie Beweglichkeit der Neutronen in den Kugelzwischenräumen addiert. Zur Berücksichtigung der Strömungseffekte der Gaskanäle im Reflektor wurden anisotrope Korrekturfaktoren der Diffusionskonstanten eingesetzt /3/.

3.4 Darstellung der Absorberstäbe

Eine direkte Behandlung der auf einem Kreis angeordneten Absorberstäbe ist mit den Mitteln des Diffusionscodes nicht möglich. Die hier zugrundeliegenden Rechenmodelle sind die Äquivalente-Wirkungsquerschnitte-Methode /14/ und das "Vorhang"-Modell /15/.

Der Ausgangspunkt der Äquivalente-Wirkungsquerschnitte-Methode ist die Übereinstimmung der Reaktionsrate (auch Leakage) eines Absorbergebietes in der Diffusionsrechnung mit der in der Transportrechnung. Hierbei beschränkt man sich auf R- θ -Geometrie. Falls eine starke Heterogenität in Z-Richtung auftritt, z.B. 2 Stäbe im Core, können stückweise die Parameter berechnet werden.

Der zylindrische Absorberstab wird bei der R- θ -Rechnung als eine kreisausschnittförmige Masche dargestellt. Abb. 5 zeigt die Stabmasche mit Nachbargebieten. Nach der in CITATION verwend-

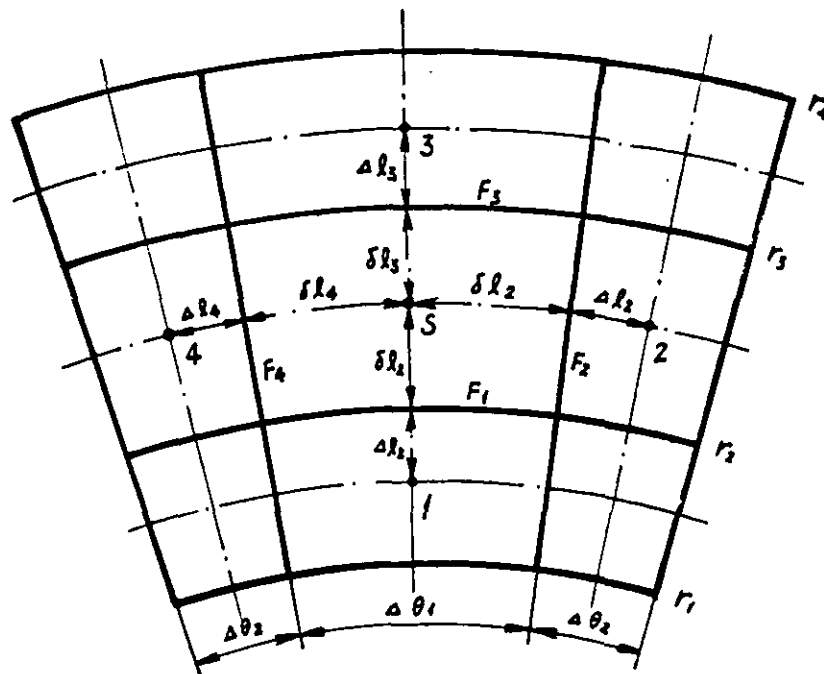


Abb.5: Stabmasche mit Nachbargebieten in R- θ -Geometrie

ten Methode wird der Leckageterm für die Stabmasche zu

$$L_C = \sum_{i=1}^4 \frac{F_i (\Phi_S - \Phi_i)}{\frac{\delta l_i}{D_S} + \frac{\Delta l_i}{D_a}}$$

bestimmt. Außer den in Abb. 5 dargestellten geometrischen Größen bedeutet

Φ_S bzw. Φ_i	Neutronenfluß in Stabmasche bzw. Nachbarmasche ($i=1,2,3,4$)
D_S bzw. D_a	Diffusionskonstante in der Stabmasche bzw. in den Nachbarmaschen
L_C	Neutronenleckage aus der Stabmasche

Unter Annahme der Flußäquivalenz für Punkte des gleichen Abstandes von der Staboberfläche (oder vom Stabzentrum) können Φ_i ($i = 1,2,3$ und 4 ; s. Abb. 5), L_C und Φ_S aus der Transportrechnung der Stabzelle entnommen werden. Damit kann anschließend mittels der oben erwähnten Gleichung D_S bestimmt werden. Es muß darauf hingewiesen werden, daß das Volumen des Absorbergebietes in beiden Modellen gleich groß sein muß.

Das "Vorhang"-Modell dient zur Ermittlung der Wirkungsquerschnitte des Stabgebietes der R-Z Darstellung. In der R- θ -Ebene ist ein solches Stabgebiet ein Kreisring. Anhand der mittels der Äquivalente-Wirkungsquerschnitte-Methode berechneten Wirkungsquerschnitte der Stabmasche wird zuerst die k_{eff} -Rechnung des R- θ -Stabmodells durchgeführt. Anschließend wird eine Suchrechnung für das Vorhangmodell nach den Nuklid-Konzentrationen des Vorhanges durchgeführt. Dabei wird der k_{eff} -Wert von der k_{eff} -Rechnung des Stabmodells entnommen und beibehalten. Die bei R-Z-Corerechnungen benötigten Wirkungsquerschnitte können damit berechnet werden.

Es ist zu bemerken, daß das oben erwähnte Absorbergebiet eine künstlich gebildete Zone ist. Es soll nicht nur den Absorber, sondern auch einen Teil von seiner Umgebung umfassen, da der Diffusionsfluß zu den Nachbarpunkten mit einer annehmbaren Abweichung mit dem Transportfluß übereinstimmen muß.

Im oberen Teil des oberen Hohlraumes befinden sich 42 Corestäbe. Der homogenisierte Wirkungsquerschnittssatz für diese Zone wird durch eine Zellrechnung mit dem Programm SN-1D ermittelt. Dabei ist es erforderlich, eine äußere Zone mit Brennstoff aufzubauen. Bei dieser Methode ist eine Unterschätzung des k_{eff} -Wertes um etwa 0,09 % zu erwarten /11/.

3.5 Wirkungsquerschnitte für einige Sonderzonen

Die homogenisierten Wirkungsquerschnitte des Deckenreflektors, des Absorbermantels und des unteren Teils des Innenrandreflektors wurden mittels der von HRB gelieferten Disadvantagefaktoren /3/ ermittelt.

3.6 Kondensation der Wirkungsquerschnitte

Aufgrund der geringen Leakage wird eine 4-Zonen-Rechnung mit dem Modul SN-1D in Plattengeometrie (axial) zur Ermittlung der Spektren durchgeführt. Diese Spektren werden zur Kondensation der jeweiligen Zonenwirkungsquerschnitte verwendet.

Um die Anwendbarkeit eines solchen Modells zu prüfen, wurde nach der Leakage-Recycling-Methode /5/ ein 9 x 12 Zonen-Modell verwendet und ein Leakage-Recycling durchgeführt. In einem Schritt des Leakage-Recycling wurden 21 eindimensionale Rechnungen durchgeführt. Dabei ergab sich auf der IBM/3033 eine Rechenzeit von etwa einer Stunde, viel mehr als beim 4-Zonen-

Modell. Die beiden so erhaltenen kondensierten Wirkungsquerschnittssätze wurden für je eine k_{eff} -Rechnung verwendet. Die resultierenden k_{eff} -Werte unterscheiden sich nur um 0,00144. Deshalb wurde für weitere Berechnungen das 4-Zonen-Modell verwendet.

3.7 Diffusionsrechnungen

Mit Hilfe der kondensierten Wirkungsquerschnitte werden zweidimensionale Diffusionsrechnungen mit dem Code CITATION durchgeführt.

Aufgrund der Corekonfiguration wird ein R-Z-Maschennetz gebildet, das 32 radiale und 68 axiale Maschen hat. Für den äußeren Rand wird Vakuum-Randbedingung eingesetzt. In Tab. 6 sind die Maschenpunkte wiedergegeben. Die Materialzonenaufteilung in Abb. 6 ist als Beispiel für eine Corekonfiguration dargestellt.

3.8 Auswertung der Reaktivitätsmessungen

Zur Messung der Reaktivität werden dynamische Meßmethoden vorgeschlagen. Nach /11/ ist aber theoretisch die Leistung P eines Reaktors nach einer Reaktivitätsänderung nicht proportional zum Detektorsignal I . Mit der Gleichung

$$\frac{p(t)}{p(0)} = \frac{\hat{\Lambda}_t}{\hat{\Lambda}_0} \cdot \frac{\hat{F}(t)}{\hat{F}(0)} \cdot \frac{RR_D(0)}{RR_D(t)} \cdot \frac{I(x,t)}{I(x,0)} = c(x) \frac{I(x,t)}{I(x,0)}$$

$\hat{\Lambda}$ die Lebensdauer der prompten Neutronen

\hat{F} das Normierungsintegral

RR_D die ortsabhängige Reaktionsrate

hat man damit eine Methode in Händen, aus gemessenen Reaktionsraten mit Hilfe statischer Diffusionsrechnungen die Zeitfunk-

tion $p(t)$ zu bestimmen. Gleichzeitig besteht die Möglichkeit, durch Vorausberechnung der Korrekturfaktoren solche Detektorpositionen zu finden, an denen die erforderlichen Korrekturen möglichst klein sind. Die Größen $\hat{\Lambda}$, \hat{F} und RR_D und die Gesamtkorrektur $C(x)$ werden über CITATION-Rechnungen bestimmt.

Tabelle 6: Maschenpunkte der R-Z Corerechnung

Radial (cm)

Pkt.	Radius	Pkt.	Radius	Pkt.	Radius	Pkt.	Radius
1	0,0	2	10,0	3	20,0	4	40,0
5	50,0	6	60,0	7	72,5	8	85,0
9	100,0	10	112,5	11	122,2	12	132,13
13	141,43	14	150,0	15	162,0	16	175,0
17	187,5	18	200,0	19	212,5	20	225,0
21	237,5	22	250,0	23	263,0	24	273,6
25	280,5	26	288,64	27	299,27	28	307,15
29	318,0	30	330,9	31	351,0	32	371,0
33	381,1						

Axial (cm)

Pkt.	Höhe	Pkt.	Höhe	Pkt.	Höhe	Pkt.	Höhe
1	0,0	2	15,0	3	30,0	4	45,0
5	60,0	6	71,5	7	81,5	8	91,5
9	101,5	10	106,5	11	111,5	12	118,5
13	125,5	14	132,5	15	139,5	16	146,5
17	153,5	18	160,0	19	167,5	20	174,5
21	181,5	22	188,5	23	195,5	24	202,5
25	209,5	26	214,5	27	219,5	28	224,5
29	229,5	30	237,0	31	244,5	32	257,0
33	269,5	34	282,0	35	294,5	36	307,0
37	319,5	38	327,0	39	334,5	40	342,0
41	364,3	42	386,6	43	407,2	44	427,8
45	448,4	46	469,0	47	489,6	48	510,2
49	530,8	50	551,4	51	572,0	52	592,6
53	614,2	54	635,8	55	655,4	56	675,0
57	693,25	58	711,5	59	723,25	60	757,0
61	777,5	62	798,0	63	820,0	64	842,0
65	858,0	66	893,0	67	928,0	68	963,0
69	998,0						

4. ANALYSEN ZUM ERSTKERN

4.1 Berechnung der nuklearen Daten

Ausgehend von den aus ENDF/B-IV abgeleiteten problemunabhängigen Bibliotheken, nämlich GGC-4 und THERM-126, wurden die problemabhängigen 50 Gruppen Wirkungsquerschnitte der im Core befindlichen Nuklide nach dem in Abschnitt 3.1 beschriebenen Verfahren erzeugt. Die Energiegrenzen in der 50 Gruppenstruktur sind in Tab. 7 wiedergegeben.

Tabelle 7: Energiegrenzen der 50 Gruppendaten

Nr.	Energie	Nr.	Energie	Nr.	Energie	Nr.	Energie
1	1.4918E+07	2	1.0000E+07	3	6.0653E+06	4	3.6788E+06
5	2.2313E+06	6	1.3534E+06	7	8.2085E+05	8	4.5049E+05
9	2.7324E+05	10	1.8316E+05	11	1.1109E+05	12	5.2475E+04
13	2.4787E+04	14	1.1709E+04	15	4.3074E+03	16	2.0347E+03
17	9.6112E+02	18	4.5400E+02	19	2.1445E+02	20	1.0130E+02
21	4.7851E+01	22	2.2603E+01	23	1.0677E+01	24	5.0435E+00
25	3.0590E+00	26	1.8554E+00	27	1.4575E+00	28	1.1665E+00
29	1.0624E+00	30	9.5070E-01	31	7.8211E-01	32	6.2493E-01
33	5.0326E-01	34	4.1704E-01	35	3.5768E-01	36	3.0113E-01
37	2.7053E-01	38	2.5104E-01	39	2.2770E-01	40	1.8444E-01
41	1.4573E-01	42	1.1157E-01	43	8.1972E-02	44	5.6925E-02
45	4.2757E-02	46	3.0613E-02	47	2.0493E-02	48	1.2397E-02
49	6.3250E-03	50	2.2770E-03	51	1.0000E-05		

Zur Erzeugung der homogenisierten Wirkungsquerschnitte des Cores wurden Rechnungen für die C.P.-Zelle, die BE-Zelle und die AE-Zelle durchgeführt. Tab. 8 zeigt die unendlichen Multiplikationsfaktoren der AE-Zelle. Der k_{∞} -Wert bei der dritten Iteration ist 97 mNile größer als bei der 1. Iteration für das Innencore bzw. 24 mNile für das Außencore. Aufgrund dieser Vergrößerung wird der k_{eff} -Wert des Cores sich entsprechend ver-

größern. Der Unterschied zwischen der 2. Iteration und der 3. Iteration ist gering, so daß es genügt, keine weiteren Iterationen durchzuführen. Aus rechnerischen Gründen sind die AE- und GE-Zonen in der BE-Zelle getrennt. Zur Kontrolle wurde in der BE-Zelle die GE-Zone mit der AE-Zone vertauscht. Der sich ergebende Unterschied des k_{eff} -Wertes beträgt nur 9 mNile und braucht deshalb nicht berücksichtigt zu werden.

Tabelle 8: k_{∞} -Werte der Zelle mit Absorberelement

Iteration	k_{∞} , IC	$\Delta k/\text{mN}$	k_{∞} , AC	$\Delta k/\text{mN}$
1 ^a	1.03227	-97	1.24375	-24
2	1.03329	+ 5	1.24422	+23
3	1.03324	0	1.24399	0

a C.P.-Zelle und BE-Zelle ohne AE+Luft

Zur Kondensation der Wirkungsquerschnitte auf 6 Gruppen wurden die Neutronenspektren gemäß des 4-Zonen-Modells ermittelt. Die benutzte 6-Energiegruppen-Struktur ist in Tab. 9 dargestellt.

Nach dem in Abschnitt 3.4 beschriebenen Verfahren wurden die Wirkungsquerschnitte der Stabvorhänge für die Corestäbe im Innencore, im Außencore, im Hohlraum und für die Reflektorstäbe berechnet. Dabei wurde die Flußäquivalenz für Punkte des gleichen Abstandes von der Staboberfläche angenommen.

Tabelle 9: Energie- und Lethargiestruktur der 6 Gruppendaten

obere Grenze		
Gruppe	Energie	Lethargie
1	1,49182E+07	-4,00000E-01
2	8,20850E+05	2,50000E+00
3	9,61120E+02	9,25000E+00
4	1,85540E+00	1,55000E+01
5	6,24930E-01	1,65882E+01
6	1,11570E-01	1,83112E+01
untere Grenze		
	1,00000E-05	2,76310E+01

Zur Untersuchung der Sensibilität solcher Annahmen wurden Berechnungen für die RS durchgeführt. Tab. 10 gibt den Überblick. T_0 und T_1 geben den Vergleich zwischen der Annahme der Flußäquivalenz für Punkte gleichen Abstandes von der Staboberfläche und der vom Stabzentrum. Der Unterschied ist nur etwa 2 % der Stabwirksamkeit. Bei T_2 ist der Außenradius der brennstoffhaltigen Zone im Vergleich zu T_0 verdoppelt. Die Differenz in der Stabwirksamkeit beträgt -0,60 % der gesamten Wirksamkeit, d.h. die aus den Annahmen der Flußäquivalenz und des Außenradius stammenden Abweichungen sind gering. Bei T_3 wird die Äquivalente-Wirkungsquerschnitte-Methode nicht benutzt, d.h. die einfach homogenisierten Diffusionskonstanten aus der Stabzellrechnung wurden in die Stabmasche des R- θ -Stabmodells eingesetzt. Bei T_4 wurden die Äquivalente-Wirkungsquerschnitte-Methode und das Vorhangmodell nicht verwendet. Die Abweichung von T_3 bzw. T_4 zu T_0 ist -6,27 % bzw. +17,66 % der gesamten Stabwirksamkeit. Dies zeigt die Notwendigkeit, das Vorhangmodell und die Äquivalente-Wirkungsquerschnitte-Methode zu verwenden.

Tabelle 10 : Vergleich zwischen verschiedenen Rechenmodellen der RS bei Füllhöhe von 334.5 cm

Nr.	Rechenmethode ^b	K_{eff}	ϕ^a	$\Delta\phi/\phi/\%$
T_0	A+V, oberf.	0.98548	-0.01657	Ref.
T_1	A+V, zentr.	0.98582	-0.01623	-2.07
T_2	A+V, vergr.	0.98558	-0.01647	-0.60
T_3	V	0.98650	-0.01554	-6.27
T_4		0.98265	-0.01950	17.66

a Der entsprechende stabfreie Kern hat einen K_{eff} -Wert von 1.00185

b In dieser Spalte bedeutet

A mittels der äquivalenten Methode behandelt

V mittels des Vorhang-Modells behandelt

4.2 Das stabfreie Core

Die 6 Gruppen Wirkungsquerschnitte jeder Zone des Cores wurden zunächst zur Untersuchung des stabfreien Cores verwendet. Dabei befinden sich die Stäbe alle in ihren obersten Positionen. Mit der Vakuumrandbedingung wurde die Neutronenreflexion von außen in den Reflektor vernachlässigt. Der Kugelabzug wurde nur mit GE beladen. Die Grenze zwischen Innen- und Außencore wurde bei jeder Füllhöhe der entsprechenden Grenze des Gleichgewichtszustandes angenähert. Der Füllfaktor ist 0,618. Tab. 11 gibt eine Übersicht über das stabfreie Core. Die k_{eff} -Werte sind im Zusammenhang mit der Füllhöhe in Abb. 7 dargestellt. Daraus ergeben sich folgende Daten für die 1. Kritikalität.

Füllhöhe	334,3 cm
Corevolumen	41,64 m ³
Anzahl der Kugeln	227537

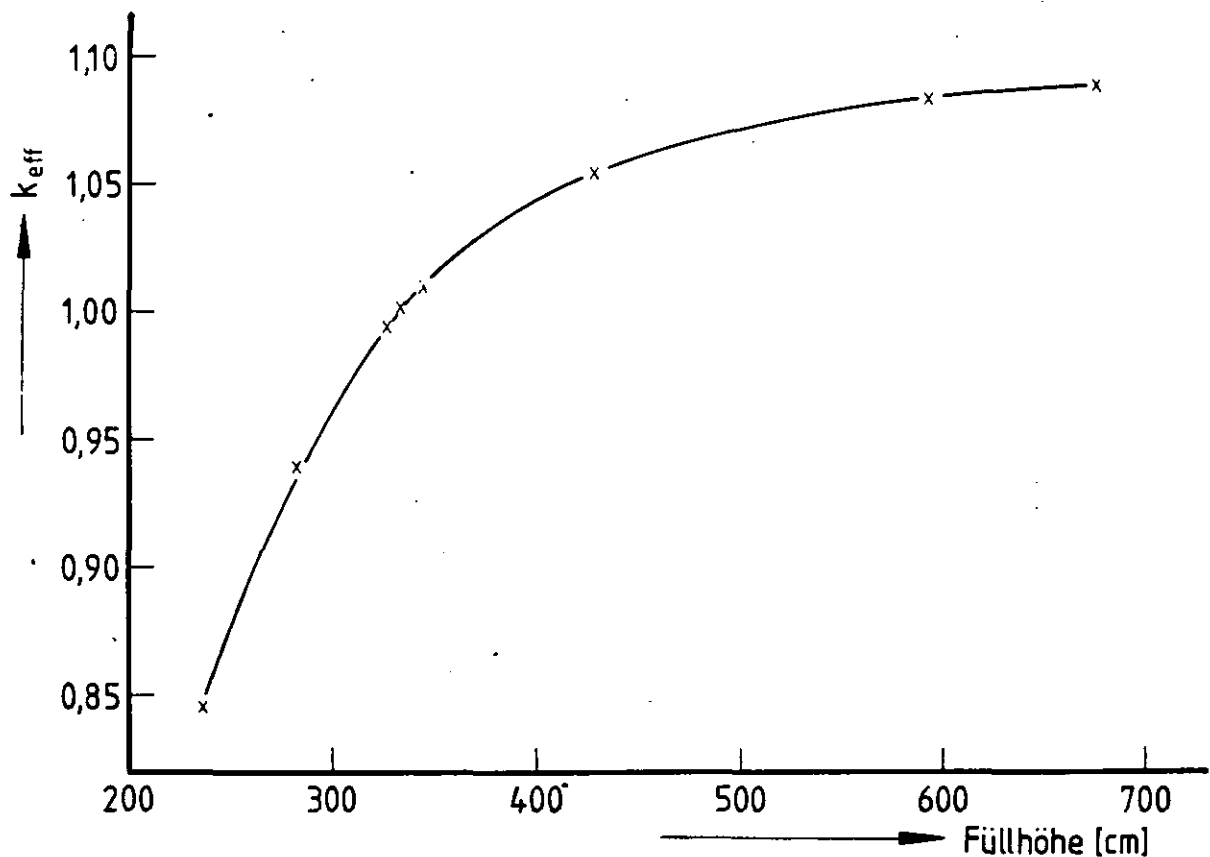


Abb.:7 k_{eff} -Werte für das stabfreie Core

Tabelle 11: k_{eff} -Werte für das stabfreie Core

F-höhe/cm	Corevolumen/m ³	Kugelzahl	k_{eff}	$\Delta K/\Delta h/\text{cm}^{-1}$
237.0	17.590	96117	0.84553	0.002085
282.0	28.713	156897	0.93935	0.001231
327.0	39.836	217676	0.99475	0.000947
334.5	41.690	227807	1.00185	0.000854
344.5	44.162	241315	1.01039	0.000528
427.8	64.752	353826	1.05437	0.000178
592.6	105.486	576409	1.08376	0.000069
675.0	125.854	687706	1.08943	

Für eine k_{eff} -Abweichung von 1 Nile ist eine Änderung der kritischen Füllhöhe von 10,5 cm bzw. eine Kugelzahl von 14182 anzunehmen. Abb. 8 bzw. 9 zeigt die Flußverteilung bei Füllhöhen von 334,5 cm bzw. 675 cm.

Bei der Füllhöhe von 344,5 cm wurden einige Fälle betrachtet. Tab. 12 gibt eine Übersicht. Während beim Core H0 alle Corestäbe bis Unterkante Deckenreflektor standen, waren sie beim Core H1 bis auf die Oberfläche der Kugelschüttung eingefahren. Der k_{eff} -Unterschied zwischen H0 und H1 zeigt, daß die Wirksamkeit aller Stäbe im Hohlraum unter den hier zugrunde liegenden Annahmen 572 mNile beträgt. Dieser Rechenfall wird auch von W.Scherer und H.Gerwin /17/ ausgehend von der HRB-Datenbibliothek untersucht und in Tab. 12 unter dem Kennzeichen HS zusammengestellt. Da es einen kleinen Unterschied des Füllfaktors (0,629 in HS bzw. 0,618 in H1) bzw. des Corevolumens zwischen H1 und HS gibt, wurde ein Core H2 mit der gleichen Kugelzahl wie das Core HS berechnet. In H3 wurden für den oberen Hohlraum anisotrope Diffusionskonstanten eingesetzt. Dabei ergibt sich eine Differenz zwischen H3 und HS von 73 mNile, die auf die Rechenverfahren und auf unterschiedliche Datenbibliotheken zurückzuführen ist.

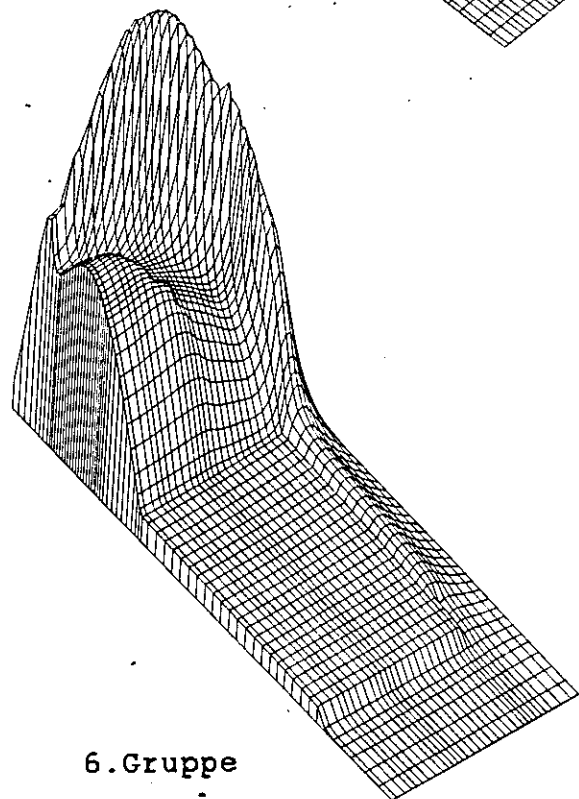
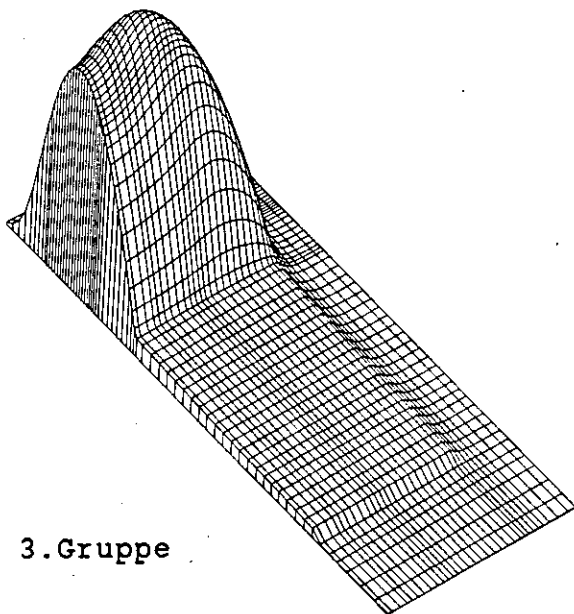
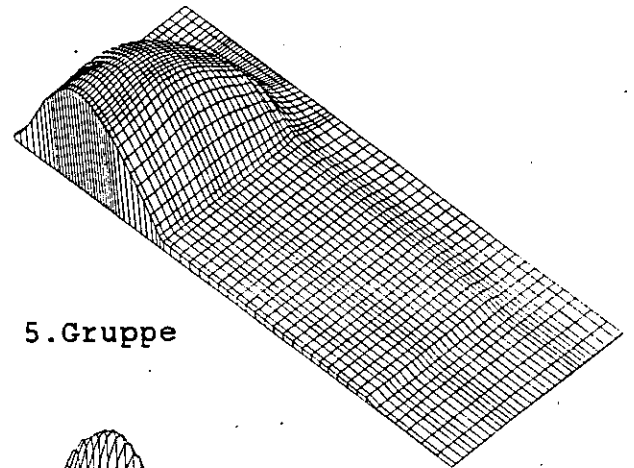
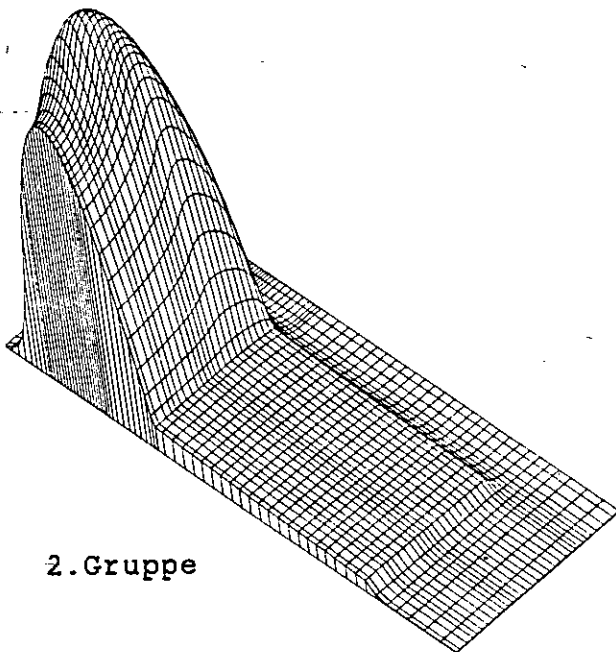
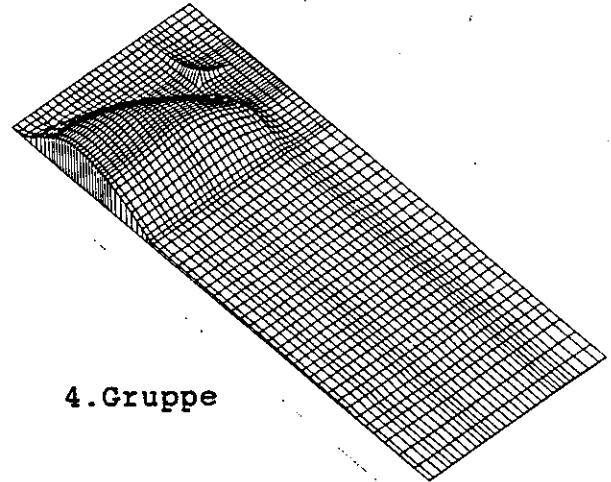
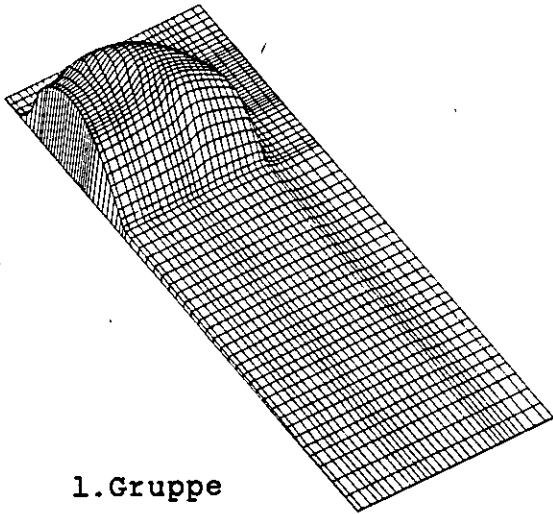
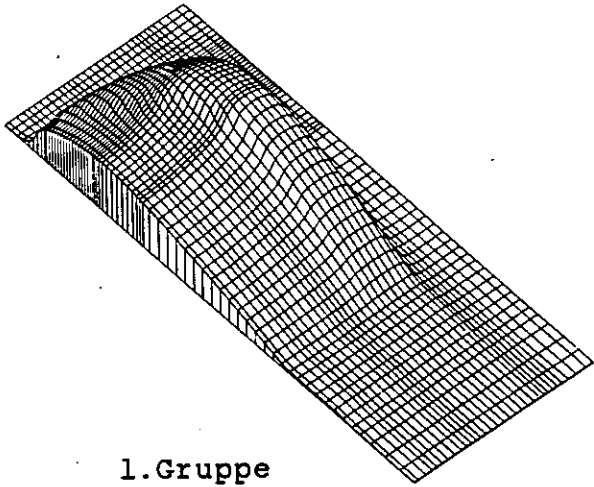
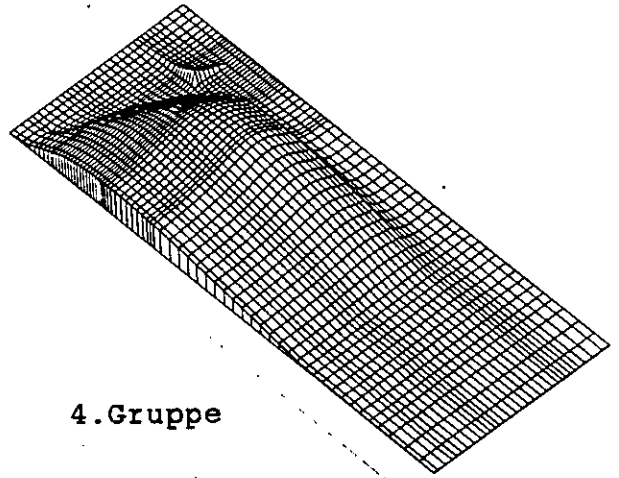


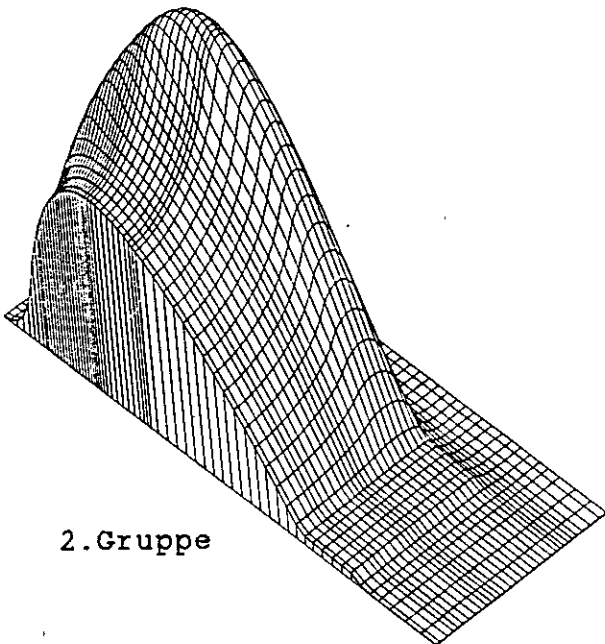
Abb.8: R-Z Neutronenfluß bei 334,5cm Beladehöhe ohne Stäbe



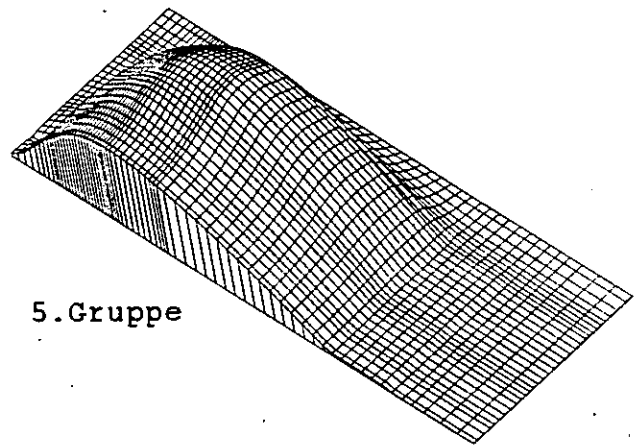
1. Gruppe



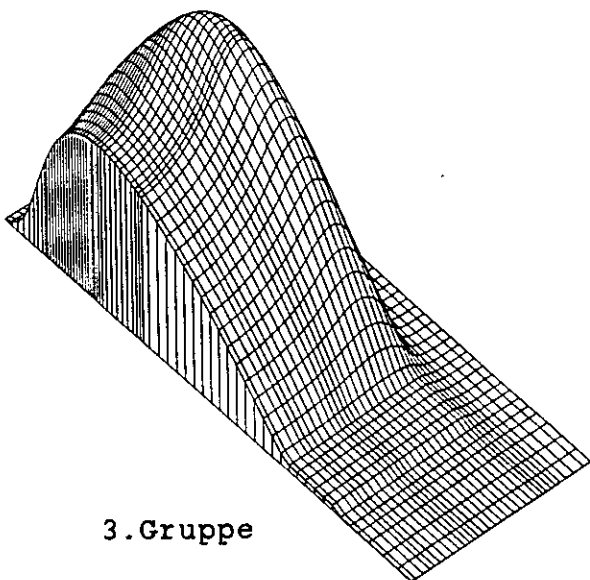
4. Gruppe



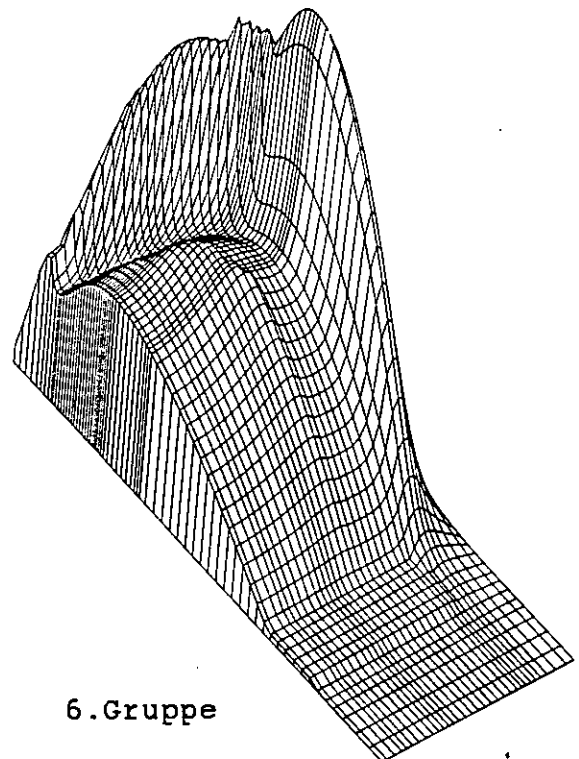
2. Gruppe



5. Gruppe



3. Gruppe



6. Gruppe

Abb.9: R-Z Neutronenfluß bei 675,0cm Beladehöhe ohne Stäbe

Tabelle 12: Einfluß der Rechenbedingungen bei einer Füllhöhe von 344.5 cm

Nr. ·	f-Faktor	Stabst.	Vol./m ³	D-konst.	Kugelzahl	K _{eff}
HO	0.618	711.5	44.162	norm.	241315	1.01039
H1	0.618	344.5	44.162	norm.	241315	1.00458
H2	0.630	344.5	44.162	norm.	246180	1.00909
H3	0.630	344.5	44.162	anis.	246180	1.00854
HS	0.629	344.5	44.255	anis.	246180	1.00781

4.3 Stabwirksamkeiten und Korrekturen zur Auswertung der Meßergebnisse

In diesem Abschnitt beschränken wir uns auf die wichtigen physikalischen Eigenschaften der RS und R2. Tab. 13 und 14 geben eine Übersicht über die k_{eff} -Werte und die Stabwirksamkeiten bei verschiedenen Füllhöhen.

Tabelle 13: k_{eff} -Werte bei versch. Füllhöhen u. Stabstellungen

Füllhöhe	0. Stäbe	36 RS	12 RS	R2	R2+36 RS
237.0	0.84553	0.84044	0.84341	0.82004	0.81653
334.5	1.00185	0.98548	0.99416	0.94636	0.92369
675.0	1.08943	1.04410	1.06679	1.04720	0.97508

Tabelle 14: Stabwirksamkeiten bei verschiedenen Füllhöhen

Füllhöhe	36 RS	12 RS	R2	R2+36 RS	36 RS ^a
237.0	0.00716	0.00297	0.03676	0.04200	0.00524
334.5	0.01658	0.00772	0.05852	0.08447	0.02595
675.0	0.03985	0.01948	0.03702	0.10765	0.07063

a Beim Zustand von voll eingefahrenen R2

Im Zustand des voll beladenen konischen Teiles des Cores, d.h. Füllhöhe von 237,0 cm, hat das Core einen k_{eff} -Wert von 0.84553. Dabei haben die RS ein gesamtes Reaktivitätsäquivalent von 0,716 %. Im voll beladenen Zustand mit voll eingefahrenen R2 und RS hat das Core den k_{eff} -Wert von 0.98424. Es ist zu bemerken, daß die Wirksamkeiten der Stäbe bei verschiedenen Füllhöhen und Stabpositionen anderer Stäbe sehr unterschiedlich sein können: Ein Drittel der gesamten 36 RS hat etwa 47 % der Wirksamkeit. Im Zustand von eingefahrenen R2 ist die Wirksamkeit der RS bei höherer Füllhöhe viel größer im Vergleich zum

Zustand von ausgefahrenen R2. Zur Begründung dieser Aussage sind in Abb. 10 und 11 die Flußverteilungen bei eingefahrenen R2 dargestellt. Im Vergleich zu Abb. 8 und 9 bemerkt man, daß die R2 eine Flußanhebung im Seitenreflektor bewirken. Auch beeinflußt die Auslegung des Deckenreflektors die Wirksamkeit der Stäbe.

Tab. 15 gibt die Wirksamkeit der 36 RS in der Nähe des stabfreien kritischen Zustandes im Zusammenhang mit ihren Stabpositionen. Die entsprechende S-Kurve ist in Abb. 12 wiedergegeben. Der Wirksamkeitshub von ihrer obersten Position bis zur Oberfläche der Kugelschüttung ist 0,00194. Der Rest, d.h. 188 cm im Bereich der aktiven Zone, liefert ein Reaktivitätsäquivalent von 0,01464. Das Reaktivitätsäquivalent pro cm im Bereich des oberen Hohlraumes beträgt nur etwa $5 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^{-1}$, im Gegensatz zu dem im Bereich der aktiven Zone von etwa $1,6 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$.

Tabelle 15: Wirksamkeit^a der 36 Reflektorstäbe

Stellung ^b /cm	K_{eff}	ρ
711.5	1.00185	0.00000
427.8	1.00079	0.00105
334.5	0.99991	0.00194
282.0	0.99640	0.00546
237.0	0.98933	0.01263
146.5	0.98548	0.01658

a Bei der Füllhöhe von 334.5 cm

b 711.5 cm bzw. 146.5 cm entspricht der höchsten bzw. niedrigsten Position

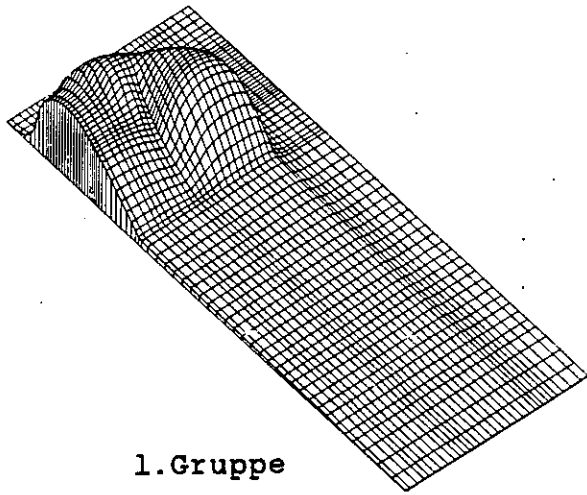
Tab. 16 faßt die zur Auswertung der inverskinetischen Methode benötigten β_{eff} und λ zusammen. Abb. 13-15 geben die im Abschnitt 3.8 definierten ortsabhängigen Gesamtkorrekturen. Für eine geeignete Position eines Detektors sollte diese Korrektur

möglichst nahe bei 1 liegen. Daher sind die eingebauten Betriebsdetektoren für Messungen der Stabwirksamkeit der RS nicht geeignet, denn die Gesamtkorrektur beträgt hier 3,75. Angemessene Detektorpositionen können im Zusammenhang mit der technischen Machbarkeit aus Abb. 13-15 bestimmt werden. Von R-Z Core-rechnungen aus ist es unmöglich, Auskunft über die azimuthalen Verhältnisse zu geben. In Abb. 16 ist der azimuthale Verlauf der Reaktionsrate am Außenrand des Seitenreflektors mittels R- θ Rechnungen bestimmt worden. Die Reaktionsrate oszilliert azimuthal um ca. 0,31 % für 36 RS, 14,1 % für 12 RS und geht gegen Null für R2. Daher dürfen die azimuthalen Schwankungen der Messung bei Anwesenheit von 36 RS und R2 vernachlässigt werden.

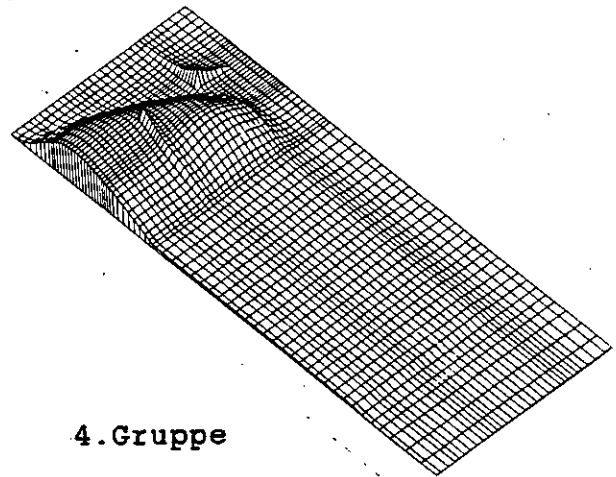
Tabelle 16: β_{eff} - und l-Werte bei 334,5 cm Füllhöhe

Fall	$\beta_{\text{eff}}/10^{-2}$	l/sec
stabfrei	0.6502	$1.02018 \cdot 10^{-3}$
36 RS	0.6502	$9.48746 \cdot 10^{-4}$
12 RS	0.6502	$9.79435 \cdot 10^{-4}$
R 2	0.6502	$1.07197 \cdot 10^{-3}$

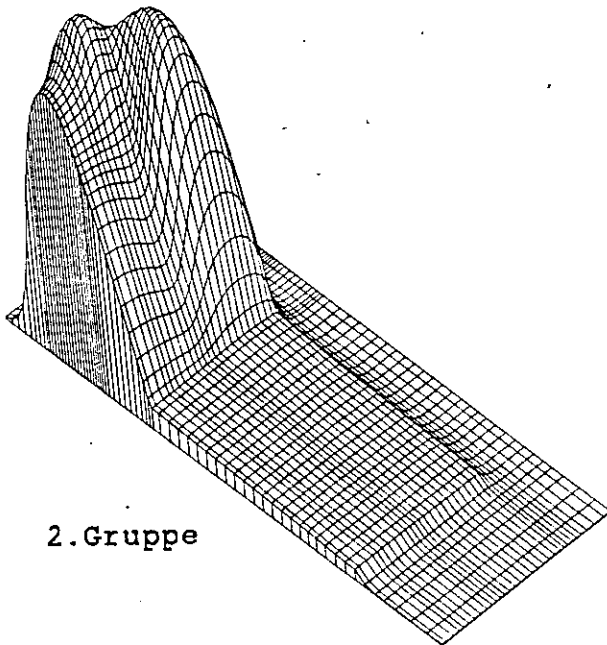
Es muß festgestellt werden, daß eine genaue Bestimmung der Gesamtkorrektur für die Detektoren außerhalb des Seitenreflektors erst unter Berücksichtigung der Einbauten um den Seitenreflektor gegeben werden kann.



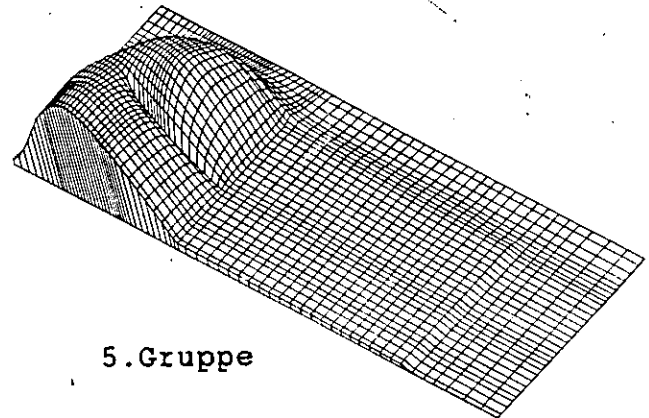
1. Gruppe



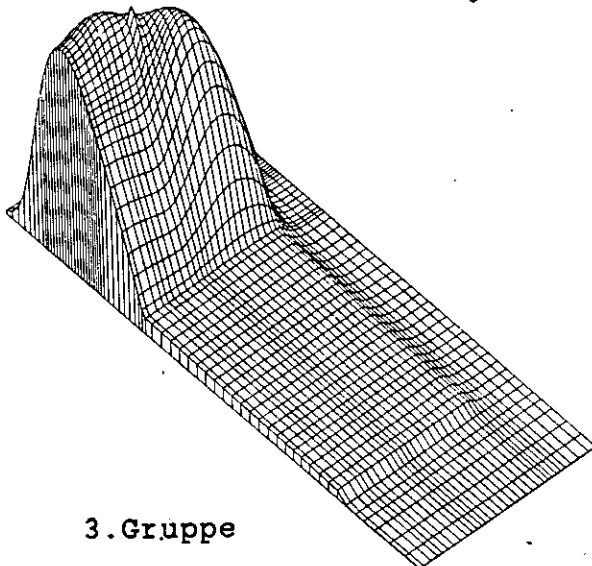
4. Gruppe



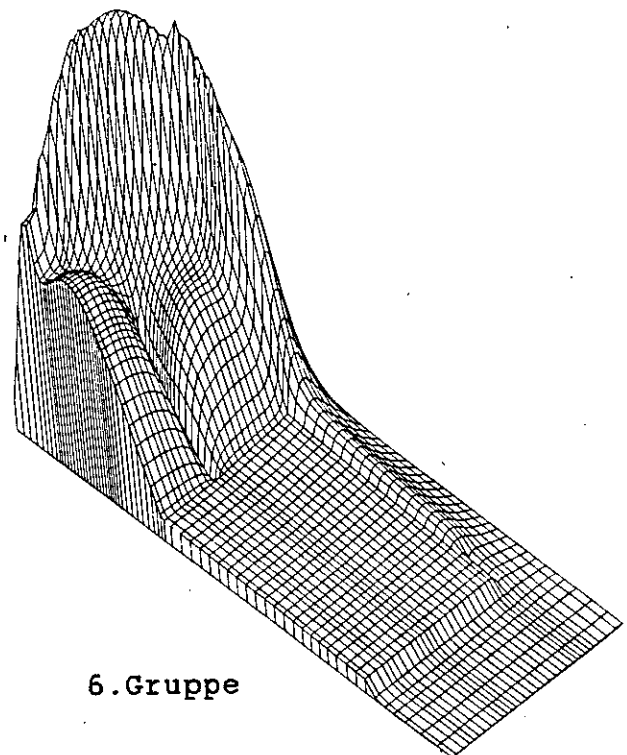
2. Gruppe



5. Gruppe

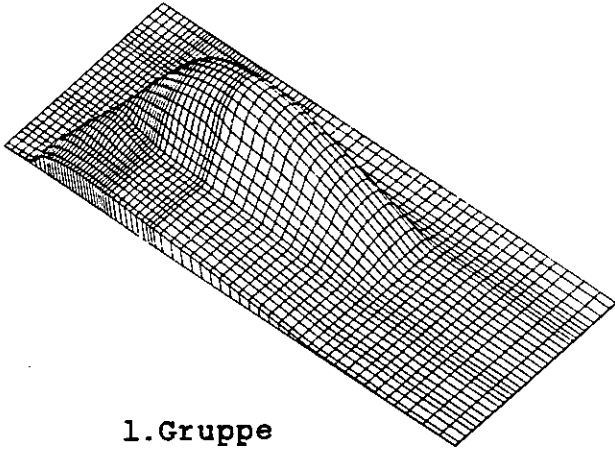


3. Gruppe

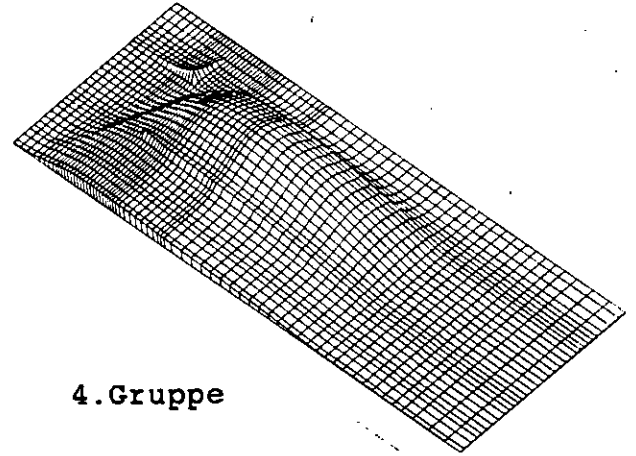


6. Gruppe

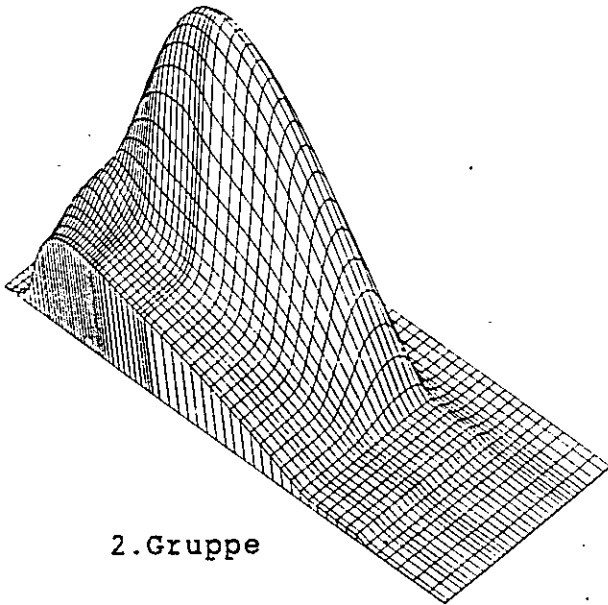
Abb.10: R-Z Neutronenfluß bei 334,5cm Beladehöhe mit R2-Stäben



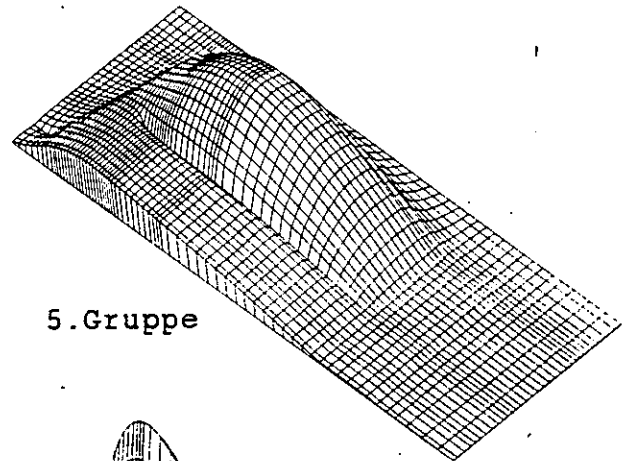
1. Gruppe



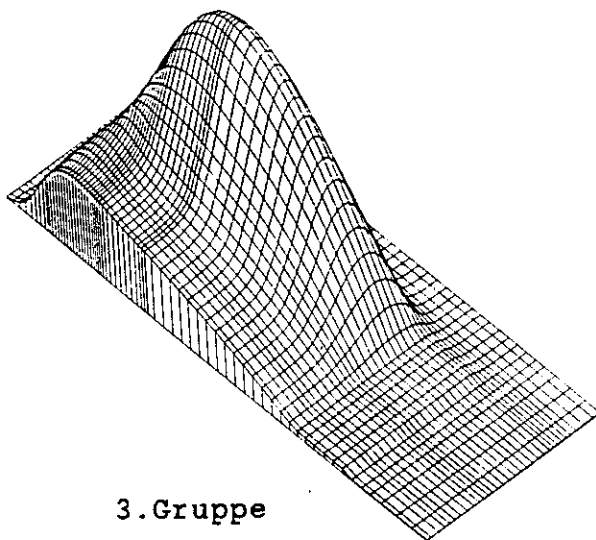
4. Gruppe



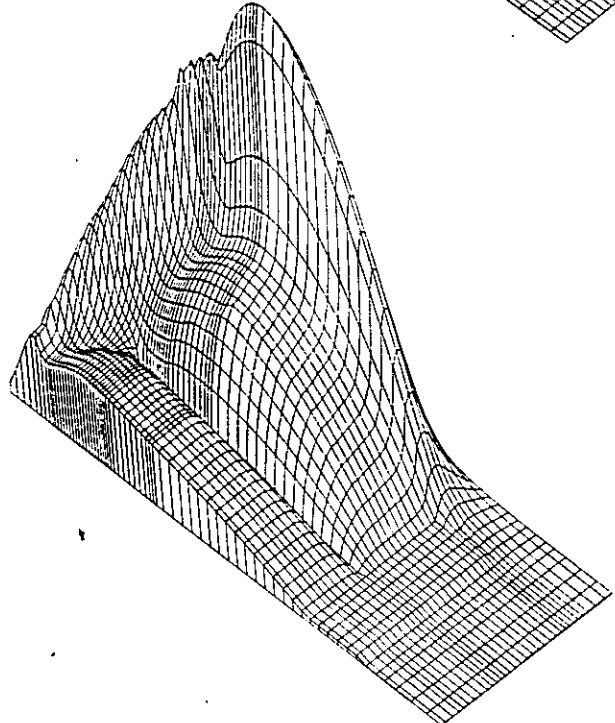
2. Gruppe



5. Gruppe



3. Gruppe



6. Gruppe

Abb.11: R-Z Neutronenfluß bei 675cm Beladehöhe mit R2-Stäben

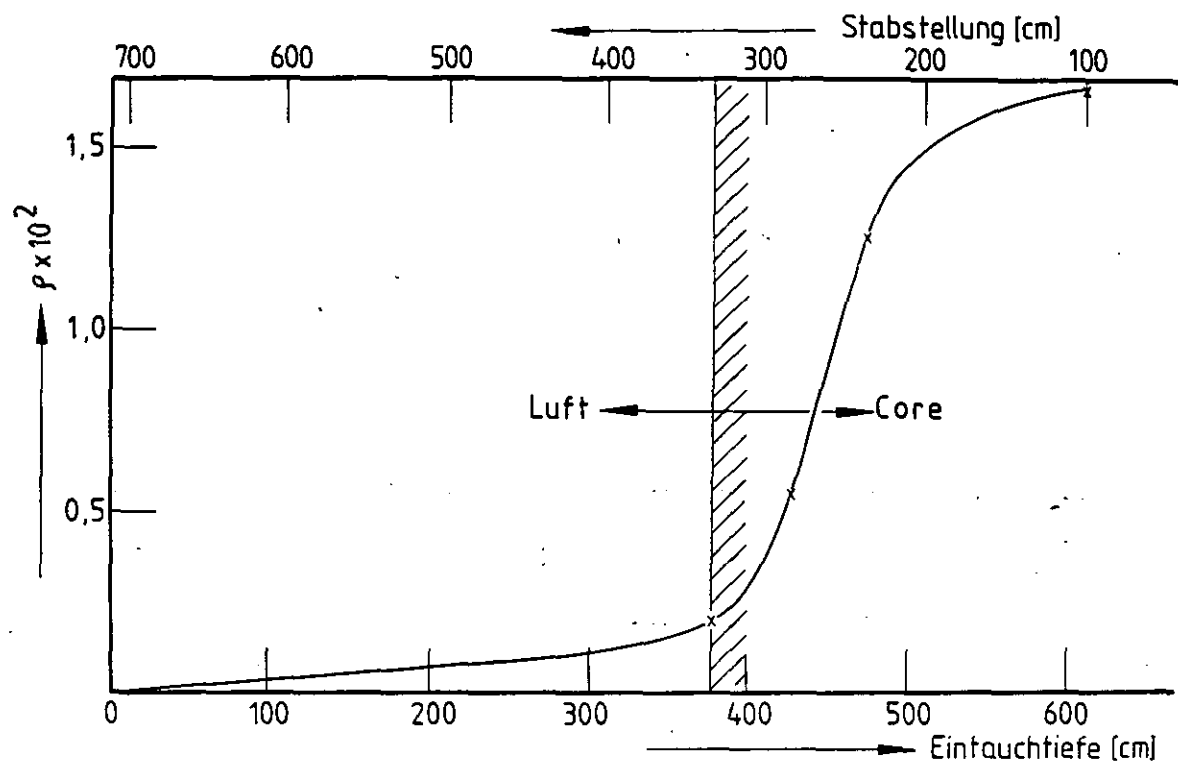


Abb.12: S-Kurve der 36 Reflektorstäbe bei 334,5 cm Füllhöhe

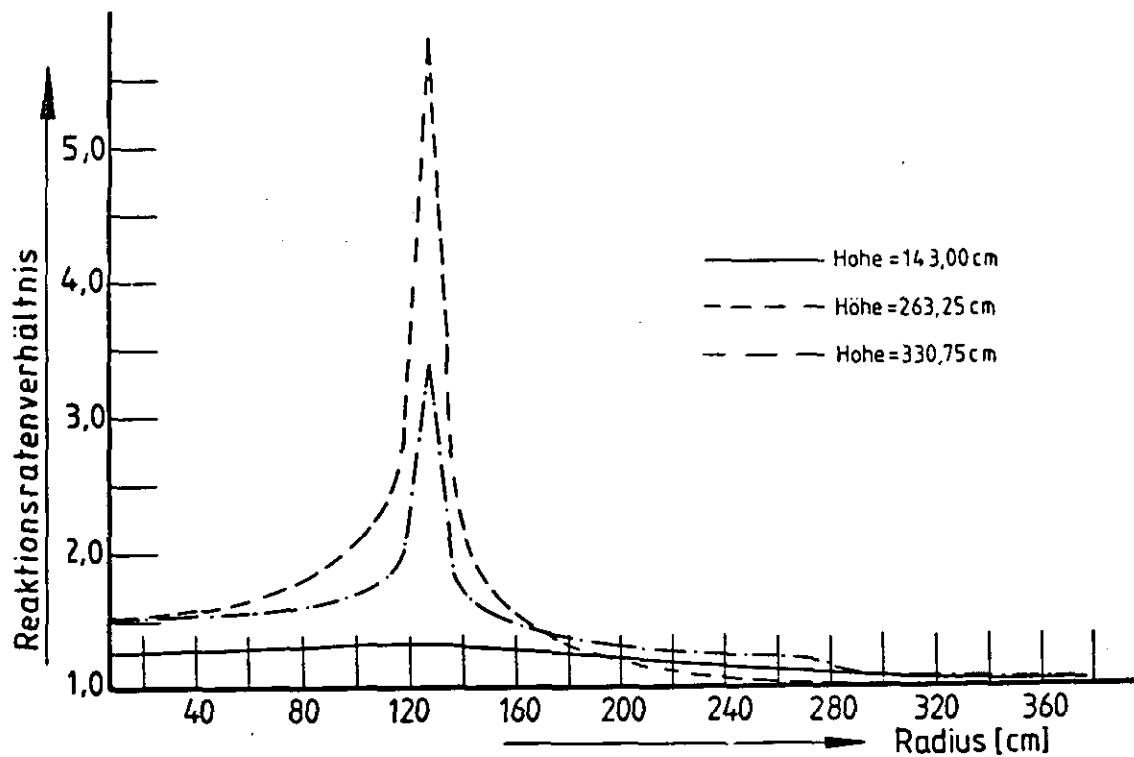


Abb.13: Berechnetes Reaktionsratenverhältnis für den Fall ohne Stäbe zu dem mit allen R2-Stäben

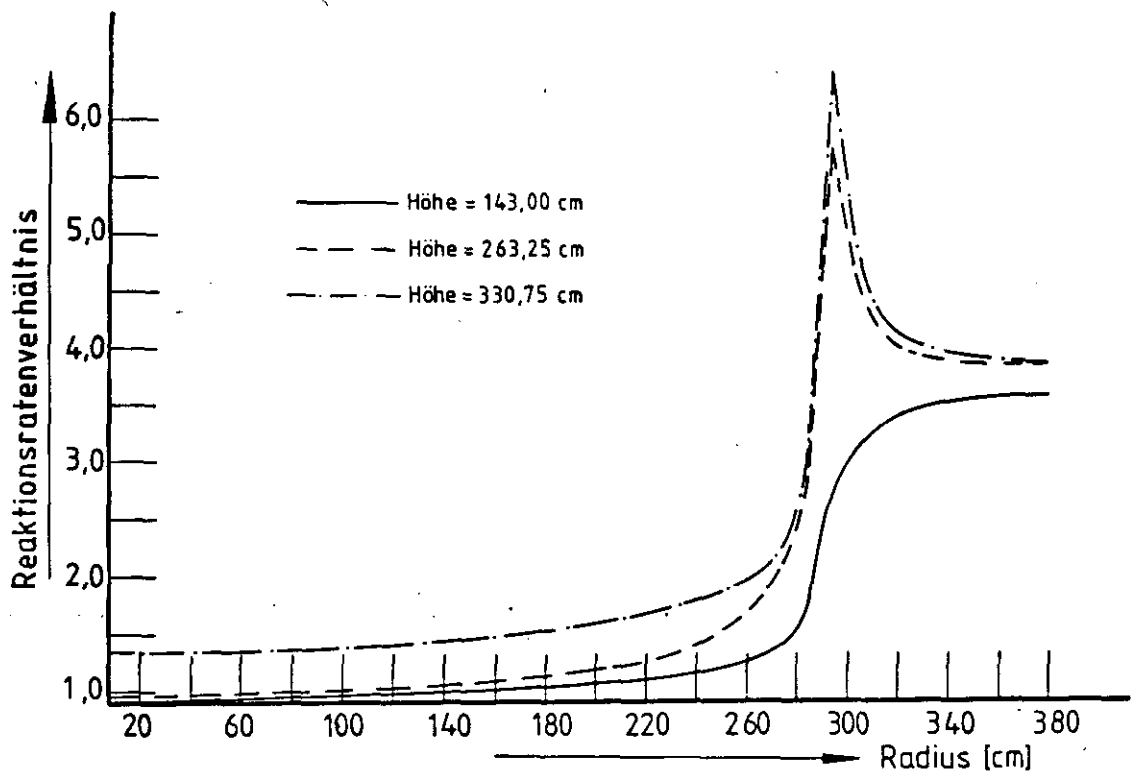


Abb.14: Berechnetes Reaktionsratenverhältnis für den Fall ohne Stäbe zu dem mit 36 Reflektorstäben

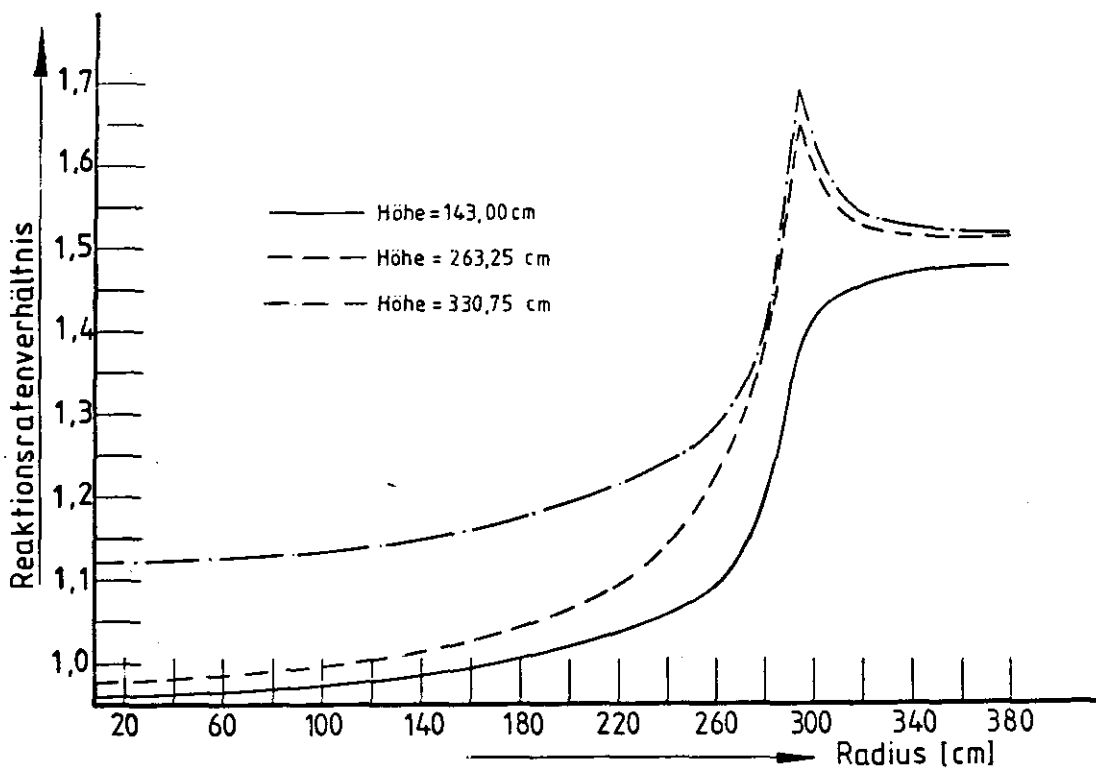


Abb.15: Berechnetes Reaktionsratenverhältnis für den Fall ohne Stäbe zu dem mit 12 Reflektorstäben

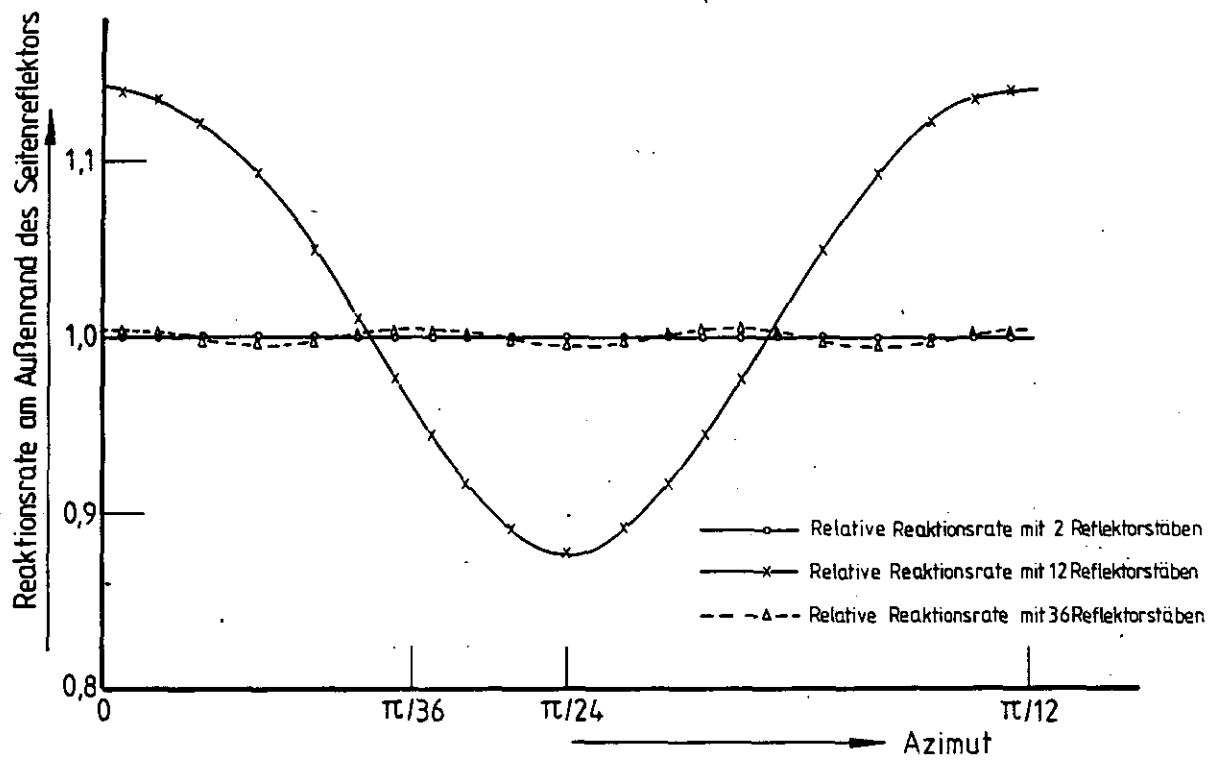


Abb.:16 Azimutverlauf der Reaktionsrate am Außenrand des Seitenreflektors

4.4 Anwendung von Stickstoff

Stickstoff hat einen relativ großen Absorptionswirkungsquerschnitt. In der aktiven Zone der Kugelschüttung von HTR befinden sich Kugelzwischenräume von etwa 38,2 % des gesamten Volumens. Durch Zugabe von N_2 ergibt sich die Möglichkeit einer homogenen Vergiftung zur Kompensation der eingebauten Überschußreaktivität. In Tab. 17 sind die Beiträge des Stickstoffs im voll beladenen Core dargestellt. Es zeigt sich, daß unter N_2 bei normalem Betriebsdruck von 40 bar das Core weit unterkritisch bleiben wird. Dabei bindet N_2 ein Reaktivitätsäquivalent von 0,32474. Bei einem N_2 -Druck von 10 bar erreicht das voll beladene stabfreie Core Kritikalität.

Tabelle 17: Beiträge von N_2 im voll beladenen Core

Druck/bar	K_{eff}	ϕ
1 ^a	1.08943	0
5	1.04857	-0.03577
10	1.00271	-0.07939
40	0.80473	-0.32474

a Luft, 1 bar, 20°C

Es muß darauf hingewiesen werden, daß bei den Berechnungen angenommen wird, daß eine N-Konzentration im Porenvolumen des Graphits vorhanden ist. Die theoretische Dichte des Graphitkristalls beträgt 2,26 g/cm³. Für eine Dichte des für Kugeln verwendeten Graphits von 1,70 g/cm³ liegt der Anteil des Porenvolumens bei 24,8 % des Graphites oder 39,3 % des gesamten Hohlraumes in der Kugelschüttung. Da aber der N_2 -Gehalt im Graphit sehr unterschiedlich aus Messungen angegeben wird, empfiehlt es sich, die N_2 -Absorptionseigenschaften und den N_2 -Anteil im betreffenden Graphit, besonders im Hinblick auf höheren Druck, experimentell zu bestimmen.

4.5 Ladevorgang und Belademethoden

Das Corebeladen wird in der Regel Schritt für Schritt durchgeführt. Zur Kompensation der Überschubreaktivität können verschiedene Methoden verwendet werden.

4.5.1 Stäbe zur Kompensation der Überschubreaktivität

Bis zur ersten Kritikalität kann das Corebeladen ohne Stäbe durchgeführt werden. Die theoretischen Voraussagen darüber sind in Abb. 9 gezeigt. Danach kann das Beladen auf verschiedene Weisen durchgeführt werden. In Tab. 18 sind die k_{eff} -Werte des Cores beim Beladen mit voll eingefahrenen R2-Stäben dargestellt. Bei einer Füllhöhe von 421 cm wird das Core wieder die Kritikalität erreichen. Beim weiteren Beladen können 24 RS oder eine andere Stabbank zur Kompensation verwendet werden. Nach Tab. 14 ist das voll beladene Core mit voll eingefahrenen R2 und 24 RS unterkritisch.

Tabelle 18: Voraussagen über das Beladen mit R2-Stäben

F-höhe/cm	Corevol./m ³	Kugelzahl	K_{eff}	$\Delta K/\Delta h/\text{cm}^{-1}$
334.5	41.690	227807	0.94636	
427.8	64.752	353826	1.00416	0.000620
592.6	105.486	576409	1.03981	0.000216
675.0	125.854	687706	1.04720	0.000090

4.5.2 Stickstoff zur Kompensation der Überschubreaktivität

Der Stickstoff scheint wegen seiner Homogenität der Vergiftung günstiger für die Überprüfung der Reaktorberechnungen und der nuklearen Daten zu sein. Nach Tab. 17 empfiehlt es sich, einen N_2 -Druck von 10 bar zu wählen. Tab. 19 zeigt das weitere Beladen des Cores unter N_2 von 10 bar. Im voll beladenen Zustand hat das Core eine Überschubreaktivität von 0,271 %. Es muß jedoch geprüft werden, ob die Beladung des Kerns unter so hohem N_2 -Druck technisch sinnvoll ist.

Tabelle 19: Voraussagen über das Beladen unter N_2 von 10 bar

Füllhöhe/cm	Corevol./m ³	Kugelzahl	k_{eff}	$\Delta K/\Delta h/\text{cm}^{-1}$
334.5	41.690	227807	0.91967	0.000539
427.8	64.752	353826	0.96997	0.000167
592.6	105.486	576409	0.99743	0.000064
675.0	125.854	687706	1.00271	

4.5.3 Alternative Belademethode

Für eine alternative Belademethode sei zurück auf Abb. 2 verwiesen. Der Durchmesser des Innencores im oberen Teil des Cores, d.h. oberhalb der Höhe von 344,5 cm, ändert sich nicht. Daher könnte man den unteren Teil nur mit Graphitkugeln auffüllen. Erst ab 344,5 cm sollten dann BE, GE und AE nach den vorher festgelegten Mischungsverhältnissen ins Core gegeben werden. Nachdem die Kugelschüttung die maximale Höhe erreicht hat, könnte man die Graphitkugeln abziehen und dadurch den unteren Teil des Cores mit Betriebselementen füllen.

Im unteren Teil des Cores befinden sich bei der alternativen Belademethode 241315 Graphitkugeln, die mit der Beschickungs-

anlage abgezogen werden müssen. Unter Berücksichtigung des Kugelfließens (im Außencore erheblich langsamer) und je nach Leistung der Beschickungsanlage ist jedoch mit Zeiträumen von mehreren Monaten zu rechnen. Da der Innenkern frühzeitig, der Außencore spät aufgebaut ist, müssen Innenkernbetriebsselemente auch dabei umgewälzt werden.

Die Überprüfung der theoretischen Berechnungen und der nuklearen Daten sollten hauptsächlich schon vor der Entnahme der Kugeln gemacht werden, weil diese Konfiguration am besten bestimmt ist. Im folgenden sind die für die Beladeexperimente benötigten Ergebnisse zusammengefaßt. Tab. 20 zeigt die k_{eff} -Werte für den alternativen Beladevorgang. Bei einer Füllhöhe von 578,9 cm erreicht das Core die 1. Kritikalität. Danach könnte das weitere Beladen auf verschiedene Weisen durchgeführt werden. Mit eingefahrenen R2 und einem Teil der RS wird das voll beladene Core unterkritisch. Unter N_2 von 10 bar kann das Core ohne Stäbe voll beladen werden. Der Vergleich zwischen Tab. 11 und Tab. 18 zeigt, daß der k_{eff} -Wert bei Füllhöhe 675 cm für das alternativ beladene Core, mit Graphitelementen im unteren Bereich, um 0,0472 niedriger liegt als für das normal beladene Core.

Tabelle 20: k_{eff} -Werte für den alternativen Beladevorgang

Füllhöhe/cm	Corevol./m ³	Kugelzahl	k_{eff}	$\Delta K/\Delta h/\text{cm}^{-1}$
510.2	40.958	223807	0.93890	0.001037
551.2	51.142	279455	0.98140	0.000672
592.6	61.326	335103	1.00921	0.000401
675.0	81.693	446399	1.04222	

In Tab. 21 und 22 sind die k_{eff} -Werte und die Stabwirksamkeiten bei verschiedenen Füllhöhen dargestellt. Tab. 23 liefert die Wirksamkeit der 36 RS in der Nähe der 1. Kritikalität in Abhängigkeit von der Stabposition.

Tabelle 21: k_{eff} -Werte beim alternativen Beladevorgang

Füllhöhe	O. Stäbe	36 RS	12 RS	R2	R2 + 36 RS
592.6	1.00921	0.94886	0.98201	0.97516	0.88920
675.0	1.04222	0.98028	1.01420	1.00775	0.91872

Tabelle 22: Stabwirksamkeit beim alternativen Beladevorgang

Füllhöhe	36 RS	12 RS	R2	R2 + 36 RS	36 RS ^a
592.6	0.06302	0.02745	0.03460	0.13373	0.09913
675.0	0.06063	0.02651	0.03282	0.12898	0.09616

a Beim Zustand von eingefahrenen R2

Tabelle 23: Wirksamkeit^a der 36 RS bei alternativer Beladung

Stellung/cm	k_{eff}	ρ
711.5	1.00921	0.00000
510.2	0.99910	0.01003
344.5	0.95171	0.05987
146.5	0.94886	0.6302

a Bei Füllhöhe von 592.6 cm

5. ZUSAMMENFASSUNG

Der vorliegende Bericht befaßt sich mit theoretischen Analysen von Erstbeladungen eines 300 MWe Kugelhaufenreaktors. Für die hier zugrunde liegenden technischen Daten des Cores wurden von HRB typische Werte zur Verfügung gestellt. Die nuklearen Daten basieren auf ENDF/B-IV.

Die verwendeten Rechenmodelle werden beschrieben und Unterschiede zwischen den Rechenmodellen ausführlich diskutiert.

Anhand der Grunddaten und der Rechenmodelle wurde die Analyse eines Beladeexperimentes besonders im Hinblick auf die Belademethode durchgeführt. Dabei wurden die für das erste Beladen benötigten Informationen über Multiplikationsfaktoren, Flußverteilungen, Stabwirksamkeiten und die zur Auswertung der dynamischen Meßergebnisse benötigten Korrekturen ermittelt.

Als alternative Belademethode wurde ein Füllen des unteren Coreteils mit Graphitkugeln und anschließendes Auffüllen mit Betriebselementen untersucht. Weiter wurde die Anwendung von Stickstoff als Reaktivitätskompensation beim Beladen analysiert. Es zeigt sich, daß Stickstoff dafür geeignet scheint, sofern ein Stickstoffdruck von 10 bar technisch nicht zu aufwendig wird. Als Reaktivitätskompensation muß der Anteil von N_2 bei Absorption in A3 Graphit experimentell bestimmt werden.

Es wurden für einen Corezustand die Rechenergebnisse mit denen der Arbeit /17/ verglichen (s. Tabelle 12). Es zeigte sich dabei sehr gute Übereinstimmung. Da beide Rechenverfahren hinsichtlich Datenerzeugung und Rechenmethode völlig unabhängig voneinander sind, stehen somit für die Berechnungen von Kugelhaufen-HTR zwei getestete Programmsysteme zur Verfügung, welche es gestatten, Hochtemperaturreaktoren mit der gleichen Genauigkeit zu berechnen, wie sie bei Leichtwasserreaktoren üblich ist.

6. LITERATURVERZEICHNIS

- /1/ R. Hecker:
Vorlesung an der RWTH Aachen (1980)
- /2/ Sicherheitsbericht des THTR-300
EURATOM-Bericht: THTR 64 (1969)
- /3/ HRB Mannheim, Technische Unterlagen und Daten
zu Kugelhaufenreaktoren (1977)
- /4/ R. Rühle:
IKE 4-12 (1973)
- /5/ R. Nabi:
Jül-1611 (1979)
- /6/ T.B. Fowler, R.D. Vondy, G.W. Cunningham:
ORNL-TM 2496, Rev. 2 (1971)
- /7/ E. Teuchert:
Nukleonik 11. Bd., 2. Heft, 68-72 (1968)
- /8/ V. Drücke, D. Filges, R. Nabi, R.D. Neef, N. Paul, H. Schaal:
Jül-1621 (1979)
- /9/ W.W. Engle:
AEC R+D Report K 1693
- /10/ B. Riik, R. Rühle:
IKE 3-3.4.1177 (1972)
- /11/ H. Gerwin, W. Scherer:
Jül-1599 (1979)

/12/ D.J. Behrens:

Proc. Phys. Soc. 62A, 607 (1949)

/13/ W. Scherer, H. Gerwin, R.D. Neef:

Jül-1136 (1974)

/14/ W. Scherer:

KFA-IRE-IB-21/80 (1980)

/15/ W. Scherer, H. Gerwin, H. Vogel:

Jül-1383 (1977)

/16/ H. Gerwin, W. Scherer:

Jül-1177 (1975)

/17/ W. Scherer, H. Gerwin:

KFA-IRE-IB-11/79 (1979)